

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE
Mention : STIC
Spécialité : Informatique et applications

École Doctorale SICMA

présentée par

Jérémy Cormier

Préparée au Centre Européen de
Réalité Virtuelle
Laboratoires Lab-STICC & CREAD

Mobiliser une analyse de
l'activité comme aide à la
conception et à l'évaluation
d'un Environnement Virtuel
pour l'Apprentissage Humain.

*Un exemple en implantologie
dentaire*

Thèse soutenue le 2 mars 2012
devant le jury composé de :

Jean-François ROULAND
Professeur, Chef de service CHRU Lille / *Examineur*

Lucile VADCARD
Maître de Conférences, UPMF Grenoble / *Examineur*

Ghislaine GUEUDET
Professeur, IUFM Rennes / *Examineur*

Pierre DE LOOR
Professeur, ENIB Brest / *Examineur*

Denis PASCO
Maître de Conférences, UBO Brest / *Encadrant*

Pierre CHEVAILLIER
Maître de Conférences, HDR, ENIB Brest / *Directeur*

Marc DES RIEUX
Président Didhaptic / *Invité*

Alain Zerilli
Maître de conférences, Doyen faculté dentaire, UBO
Brest / *Invité*

UNIVERSITE EUROPEENNE DE BRETAGNE

- Thèse de doctorat -

Mention : STIC

Spécialité : Informatique et applications

Mobiliser une analyse de l'activité comme
aide à la conception et à l'évaluation d'un
Environnement Virtuel pour l'Apprentissage
Humain

Un exemple en implantologie dentaire

JEREMY CORMIER

Soutenue le « 2 mars 2012 » devant la commission d'examen :


Jean-François	Rouland	Professeur, Chef de service du CHRU, Lille	Rapporteur
Lucile	Vadcard	Maître de Conférences, UPMF, Grenoble	Rapporteur
Ghislaine	Gueudet	Professeur, IUFM de Bretagne, Rennes	Examinateur
Pierre	De Loor	Professeur, ENIB, Brest	Examinateur
Denis	Pasco	Maître de Conférences, UBO, Brest	Encadrant
Pierre	Chevallier	Maître de Conférences, HDR, ENIB, Brest	Directeur
Marc	des Rieux	Président de Didhaptic	Invité
Alain	Zerilli	Doyen de la faculté dentaire, UBO, Brest	Invité



Mobiliser une analyse de l'activité comme
aide à la conception et à l'évaluation d'un
Environnement Virtuel pour l'Apprentissage
Humain


Un exemple en implantologie dentaire

Thèse de doctorat

JEREMY CORMIER

<p><u>Thèse Financée par la société Didhaptic :</u></p> <p>Didhaptic - Maison de la Technopole - 6 rue Léonard de Vinci BP 0119 - 53001 Laval cedex (France) +33 (0)2 43 49 75 41 - contact@didhaptic.com</p>	
--	---

<p><u>Thèse réalisée dans les laboratoires :</u></p> <p>Lab-STICC : Laboratoire en sciences et techniques de l'information, de la communication et de la connaissance, UMR-CNRS-3883 6 avenue Le Gorgeu, CS93837, 29238 Brest Cedex 3 gilles.burel@univ-brest.fr</p> <p>CREAD : Centre de Recherche sur l'éducation, les apprentissages et la didactique, EA 3875 153 rue Saint Malo, 35043 Rennes Cedex Jean-noel.blocher@bretagne.iufm.fr</p>	 
---	--

<p><u>Thèse réalisée à l'UBO dans l'école doctorale ED SICMA :</u></p> <p>Université de Bretagne Occidentale 6, avenue le Gorgeu, 29200 Brest edsicma@univ-brest.fr</p>	
--	---

Remerciements

Un travail de thèse est le fruit d'un long et passionnant travail collectif. Ainsi en préambule, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à la réussite de mon parcours.

Je tiens tout d'abord à remercier les Professeur Pierre De Loor et Jacques Tisseau pour avoir accepté de m'accueillir au sein du Centre Européen de Réalité Virtuelle et Marc Des Rieux président de la société Didhaptic pour le financement des ces travaux de recherches.

Je remercie Lucile Vadcard et Jean-François Rouland, pour avoir accepté de rapporter ces travaux de thèse.

Je remercie Ghislaine Geudet, pour avoir présidé mon jury. Merci d'avoir tout mis en œuvre pour le bon déroulement de la soutenance.

Je remercie Alain Zerilli et les membres de la faculté d'odontologie de Brest pour l'expertise métier qu'ils m'ont apporté.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Pierre Chevaillier mon directeur de thèse et surtout à Denis Pasco mon encadrant sans qui cette thèse ne serait pas ce qu'elle est. Je le remercie pour m'avoir montré ce qu'était le monde de la recherche, pour les nombreuses collaborations qu'il m'a apportés, pour son dynamisme, sa patience et son infatigable énergie.

Je souhaite évidemment remercier l'ensemble des membres du CERV pour leur soutien scientifique mais aussi et surtout pour avoir réussi à créer une ambiance productive et conviviale au sein et en dehors du laboratoire: Merci donc à Ronan, Franck, Cédric, Elisabetta, Camille, Fabien, Pascal, Alexi, Goby, Eric, Fabrice, Zac, Marc, Gireg, Fred, Hai, Mukesh, Pit, Laurent et Nicole.

Je tiens également à adresser un remerciement particulier à Cyril Bossard pour son implication dans l'évaluation de VirTeaSy et ses nombreux conseils.

Je tiens à remercier chaleureusement toute ma famille pour son soutien constant tout au long de mes études et de mon doctorat.

Merci, à Éliane pour cette relecture orthographique et grammaticale.

Enfin, merci à toi, ma chérie Laetitia pour m'avoir supporté avec toutes mes mauvaises humeurs, mes moments d'absence alors même que j'étais présent.

Table des matières

Remerciements	7
Table des matières	8
Table des figures	13
Liste des tableaux	17
1er chapitre : Problématique professionnelle	19
1) Un domaine encore peu exploité	19
2) Une première tentative	19
3) Une nouvelle approche	20
4) Un partenariat	25
5) Conclusion du chapitre et annonce du plan de thèse	25
2e chapitre : Utiliser les technologies de réalité virtuelle pour apprendre	27
1) Introduction	27
2) Les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH)	27
2.1) Définition : des EIAH aux EVAH	27
2.2) Origine des EVAH	30
2.3) Pédagogie utilisée : approche constructiviste	31
2.4) Avantages des EVAH : dans quelles situations les utiliser ?	32
2.5) Mesures et limites des EVAH	33
2.6) Dispositifs de réalité virtuelle	34
3) Les EVAH dans le domaine dentaire	36
3.1) EVAH interaction « clavier-souris »	37
3.2) EVAH interaction « modèle physique »	39
3.3) EVAH interaction « haptique »	41

3.4) Classification des EVAH dans le domaine dentaire	53
4) Modèle de conception des EVAH	57
4.1) Modèle de conception des EVAH dans le domaine dentaire	57
4.2) Modèles de conception des EVAH basé sur les sciences humaines	59
5) Conclusion du chapitre	62
3e chapitre : Une approche en analyse de l'activité pour le développement d'EVAH	65
1) Introduction	65
2) La didactique professionnelle	66
2.1) Psychologie du travail : emprunts et positionnements	66
2.2) La psychologie du développement : emprunts et positionnements	67
2.3) Les concepts organisateurs	69
3) Analyser le travail en didactique professionnelle	71
3.1) La compétence du point de vue de la didactique professionnelle	71
3.2) La structure conceptuelle de la situation	72
4) Structure conceptuelle de la situation : une revue de littérature	75
4.1) Etudes sur les systèmes non-vivants	75
4.2) Études sur les systèmes vivants	82
5) Conclusion du chapitre	87
4e chapitre : Étude 1 : analyse de l'activité de chirurgiens-dentistes en implantologie	89
1) Introduction	89
2) Analyse <i>a priori</i> de la tâche prescrite	89
2.1) L'intervention chirurgicale	90
3) Analyse de l'activité	97
3.1) Participants	97
3.2) Procédure de recueil des données	99
3.3) Analyse des données	102
4) Résultats : identification de la structure conceptuelle de la situation	106

4.1) L'émergence comme dimension visible	108
4.2) L'ancrage comme dimension invisible.....	111
4.3) Opérationnalisation de la structure conceptuelle de la situation	114
5) Discussion	118
5.1) L'activité des chirurgiens-dentistes en implantologie	118
5.2) De l'activité des chirurgiens-dentistes en implantologie aux activités d'acteurs engagés dans la gestion d'environnements liés aux vivants.....	120
6) Conclusion du chapitre.....	122
5e chapitre : De la structure conceptuelle de la situation à la conception de VirTeaSy	125
1) Introduction.....	125
2) Définition du type d'EVAH et de ses caractéristiques « Hardware ».....	127
2.1) Un système de visualisation pour apprendre des habiletés perceptivo-cognitives	128
2.2) Un périphérique haptique pour apprendre une habileté motrice	130
2.3) Une ergonomie globale proche de la situation de travail	131
3) Définition de l'environnement virtuel et des situations d'apprentissage	131
3.1) L'environnement virtuel	132
3.2) Situations d'apprentissage : démarche de conception et présentation de la première situation d'apprentissage	133
4) L'enrichissement des situations d'apprentissage grâce à la réalité virtuelle.....	136
4.1) Les aides en situation d'apprentissage : identification des éléments de la structure conceptuelle de la situation	136
4.2) L'évaluation : objectivation des actions réalisées	140
4.3) Le jeu : lier les éléments de la structure conceptuelle de la situation.....	141
5) Gestion de la complexité.....	142
5.1) Sélection et hiérarchisation des cas cliniques	142
5.2) L'interface formateur.....	144
5.3) Les ateliers : des situations d'apprentissage simplifiées	145
6) Intégration de l'EVAH à un dispositif de formation.....	147

6.1) Le poste étudiant.....	147
6.2) L'interaction du poste étudiant avec VirTeaSy	148
7) Conclusion du chapitre.....	149
6e chapitre : Étude 2 : évaluation préliminaire de VirTeasy	151
1) Introduction	151
2) Approches et outils utilisés pour évaluer les EVAH « haptiques » du domaine dentaire	151
2.1) Évaluation par questionnaire de satisfaction	152
2.2) Évaluation par comparaison entre experts et novices.....	155
2.3) Évaluation par comparaison entre un test pré et post-formation en EVAH ...	156
2.4) Évaluation par comparaison entre une formation traditionnelle et formation en réalité virtuelle.....	158
2.5) Évaluation par étude du transfert d'apprentissage du virtuel au réel.....	161
2.6) Conclusion sur la revue de littérature	163
3) Étude pour l'évaluation de VirTeaSy.....	166
3.1) Cadre théorique : le transfert d'apprentissage du virtuel au réel	166
3.2) Les études sur le transfert du virtuel au réel	169
3.3) Objectif de l'étude et hypothèses.....	170
3.4) Méthode	172
3.5) Résultats.....	177
3.6) Discussion.....	181
4) Conclusion du chapitre.....	186
7e chapitre : Conclusion générale	189
1) La didactique professionnelle pour analyser l'activité.....	189
2) La conception d'EVAH : du spécifique au générique.....	191
3) L'évaluation de VirTeaSy et ses perspectives	192
Références bibliographiques	195
Annexe : Guide d'entretien	209

Résumé	218
Summary	220

Table des figures

Figure 1–1 : Système « Haptik » de la société Digisens	20
Figure 1–2 : Nombre de dentistes posant des implants par rapport au nombre total de dentistes en 2009	22
Figure 1–3 : Pourcentage de part du marché mondial pour les sociétés fabricantes d’implants en 2009	22
Figure 1–4 : Évolution du nombre de dents manquantes en fonction de l’âge pour les zones Amérique du Nord, Europe, Japon.....	23
Figure 1–5 : Illustration de l’enseignement pratique en implantologie	24
Figure 2–1 : Caractéristiques de la réalité virtuelle (présence et autonomie) (Tisseau et Harrouet, 2003)	28
Figure 2–2 : Illustration du simulateur Link (1929).....	31
Figure 2–3 : Exemple de dispositifs avec rendu graphique stéréoscopique.....	34
Figure 2–4 : Illustration du type de localisation du rendu graphique.....	35
Figure 2–5 : Illustration de systèmes de tracking de tête	35
Figure 2–6 : Exemples de périphérique haptique	36
Figure 2–7 : Illustration du système « DSEplus » de la société Kavo	37
Figure 2–8 : Illustration de l’EVAH Second Life (Dental Education)	38
Figure 2–9 : Illustration du système Robodent	39
Figure 2–10 : Illustration du système DentSim développé par DenX.....	40
Figure 2–11 : Illustration du Système IGI.....	41
Figure 2–12 : Illustration d’un EVAH non colocalisé (exemple du système Sensable Dental Lab System).....	42
Figure 2–13 : Illustration d’un EVAH colocalisé (exemple du système Dental Trainer).....	43
Figure 2–14 : Illustration d’un EVAH colocalisé avec point d’appuis sur mannequin, (exemple du système Kobra).....	44

Figure 2–15 : Illustration de l'EVAH conçu par Lui et al. (2008).....	45
Figure 2–16 : Illustration de l'EVAH Periosim©	47
Figure 2–17: Ergonomie et interface de l'EVAH IDSS.....	48
Figure 2–18 : Illustration de l'EVAH “Rhienmora”	49
Figure 2–19: Système de visualisation basé sur la réalité augmenté	49
Figure 2–20 : Ergonomie et interface de l'EVAH Voxel-Man Dental	50
Figure 2–21 : Illustration des trois niveaux d'aides du système Voxel-Man Dental	51
Figure 2–22 : Illustration de l'EVAH HapTEL de Kings College London	52
Figure 2–23 : Illustration du positionnement des EVAH dans le domaine dentaire.....	54
Figure 2–24 : Démarche de conception des EVAH dans le domaine dentaire	58
Figure 2–25 : Modèle de conception intégrant les sciences humaines	59
Figure 2–26 : Illustration de l'EVAH ARéViRoad.....	60
Figure 2–27 : Illustration de l'EVAH CoPeFoot	60
Figure 2–28 : Apports des sciences humaines dans la conception d'EVAH	61
Figure 3–1 : Modélisation typique d'une structure conceptuelle de la situation	73
Figure 3–2 : Structure conceptuelle de la situation de conduite de presses à injecter	76
Figure 3–3 : Structure conceptuelle de la situation de conduite de HF.....	77
Figure 3–4 : Représentation schématique de la structure conceptuelle de la situation de conduite de centrale nucléaire	79
Figure 3–5 : Structure conceptuelle de la situation de la taille de la vigne.....	82
Figure 3–6 : Structure conceptuelle de la situation de chirurgie orthopédique.....	85
Figure 4–1 : Illustration des trois phases de l'implantologie	90
Figure 4–2 : Illustration de la signification des secteurs sur les mâchoires	90
Figure 4–3 : Illustration de la phase d'incision	91
Figure 4–4 : Illustration du matériel spécifique à l'implantologie.....	92
Figure 4–5 : Illustration d'un aplanissement de crête osseuse	93

Figure 4–6 : Illustration du pointage de la crête osseuse grâce à la fraise boule	93
Figure 4–7 : Illustration du passage du foret pilote.....	94
Figure 4–8 : Illustration d'un foret intermédiaire et d'un foret pilote.....	94
Figure 4–9 : Illustration du passage du foret d'évasement.....	95
Figure 4–10 : Illustration de l'étape de taraudage.....	95
Figure 4–11 : Illustration de la mise en place de l'implant et de sa vis de cicatrisation	96
Figure 4–12 : Illustration de l'intervention chirurgicale en l'implantologie.....	97
Figure 4–13 : Illustrations des trois types d'interventions observées	99
Figure 4–14 : Illustration du montage des séquences vidéos	100
Figure 4–15 : Illustration de l'enregistrement vidéo d'un entretien d'auto-confrontation.....	101
Figure 4–16 : Illustration du passage des verbatim à la catégorie conceptualisante	103
Figure 4–17 : Structure conceptuelle de la situation obtenue pour l'implantologie dentaire	107
Figure 4–18 : Illustration de l'adaptation de la tâche prescrite lors de l'activité	117
Figure 5–1 : Illustration de l'EVAH VirTeaSy	128
Figure 5–2 : Illustration du système de visualisation.....	129
Figure 5–3 : Illustration du périphérique.....	130
Figure 5–4 : Illustration du pied télescopique	131
Figure 5–5 : Illustration de l'environnement virtuel et de l'interface pour sélectionner les instruments dentaires.....	133
Figure 5–6 : Illustration de la première situation d'apprentissage	136
Figure 5–7 : Illustration de l'aide « localisation »	137
Figure 5–8 : Illustration de l'aide « axe »	137
Figure 5–9 : Illustration de l'aide pour la profondeur et l'enfouissement	138
Figure 5–10 : Illustration de l'aide pour l'échauffement	139
Figure 5–11 : Illustration des examens radiographiques disponibles	139
Figure 5–12 : Illustration de l'interface « évaluation ».....	140

Figure 5–13 : Illustration de la fonction « rejeu ».....	141
Figure 5–14 : Illustration de l’interface « formateur » sur un écran déporté	145
Figure 5–15 : Illustration de l’atelier « densité osseuse »	146
Figure 5–16 : Illustration du poste étudiant	147
Figure 5–17 : Illustration de la boucle d’apprentissage entre le poste étudiant et VirTeaSy.	149
Figure 6–1 : Illustration de l’EVAH Periosim© avec double écran	153
Figure 6–2 : Illustration des forces appliquées en phases de pré et de post-test	158
Figure 6–3 : Hypothèses expérimentales	172
Figure 6–4 : Protocole expérimental	174
Figure 6–5 : Illustration de la formation traditionnelle	175
Figure 6–6 : Illustration de la formation sur l’EVAH VirTeaSy	176
Figure 6–7 : Mesures des performances sur scanner.....	177
Figure 6–8 « Boîtes à moustaches » mesures angulation, émergence et centration.....	179

Liste des tableaux

Tableau 2–1 : Synthèse des EVAH basés sur une interaction « haptique ».....	55
Tableau 4–1 : Étude démographique de l'échantillon.....	98
Tableau 5–1 : Classification des cas cliniques dans VirTeaSy	143
Tableau 5–2 : Classification pour le premier exercice implémenté dans VirTeaSy	144
Tableau 6–1 : Protocole de l'expérimentation de Steinberg et al. (2007).....	153
Tableau 6–2 : Protocole de l'expérimentation de Suebnukarn et al. (2009).....	155
Tableau 6–3 : Protocole de l'expérimentation de Suebnukarn et al. (2010).....	157
Tableau 6–4 : Protocole de l'expérimentation de Jasinevicius et al. (2004).....	159
Tableau 6–5 : Protocole de l'expérimentation de Von Sternberg et al. (2007).....	162
Tableau 6–6 : Synthèse des études sur les effets de la réalité virtuelle dans l'apprentissage d'une habileté motrice dentaire	164
Tableau 6–7 : Données brutes des mesures en fonction des groupes.....	178
Tableau 6–8 : Résultat du test de Levene.....	179
Tableau 6–9 : Résultat de l'analyse de variance pour l'angulation.....	180
Tableau 6–10 : Résultat de l'analyse de variance pour l'émergence	180
Tableau 6–11 : Résultat de l'analyse de variance pour la centration	181

1er chapitre : Problématique professionnelle

1) Un domaine encore peu exploité

L'utilisation de la réalité virtuelle pour la formation s'est développée dans différents domaines comme l'aviation, la conduite ou la préparation militaire (Salas, Bower et Rhodenizer, 1998) mais également dans le monde médical (Liu, Tendick, Cleary et Kaufmann, 2003). En effet depuis dix ans, la simulation médicale est un domaine très actif de recherche. L'objectif est de fournir aux médecins des simulateurs dans lesquels ils pourront se former aux diagnostics, aux prises de décisions, aux procédures ainsi qu'aux gestes chirurgicaux. Selon Silveira (2004), l'utilisation de simulateurs médicaux permet de diminuer l'exposition des patients à des risques et apparaît comme une alternative à la formation par la pratique sur animaux ou cadavres humains posant des problèmes éthiques et médico-légaux.

De nombreux simulateurs ont été développés dans différents secteurs médicaux comme l'endoscopie (Wilhelm, Ogan, Roehrborn, Cadeddu et Pearle, 2002 ; Ferlitsch et al., 2002), la chirurgie endovasculaire (Leea et al., 2009 ; Coates, Zealley et Chakraverty, 2010), l'hystéroscopie (Montgomery et al., 2001 ; Harders, Steinemann, Gross et Székely, 2005), l'obstétrique (Moreau et al., 2007a, 2007b), l'ophtalmologie (Rouland et al., 1995 ; Dumortier et al., 2010) ou la laparoscopie (Blavier, Gaudissart, Cadière et Nyssen, 2007 ; Iwata et al., 2010).

Bien que le domaine dentaire présente les mêmes caractéristiques que le milieu médical en termes de difficultés de formation par la pratique et de risques pour le patient, Luciano (2009) note que l'utilisation de simulateurs n'y a pas encore été bien exploitée.

2) Une première tentative

Le docteur François Curnier figure parmi les pionniers du domaine de la formation dentaire par la réalité virtuelle en Europe. En 2002, il crée la société Digisens¹, spécialisée dans le développement de logiciels pour l'apprentissage en médecine dentaire et l'exploitation scientifique de reconstruction 3D par microtomographie. Un des projets de la société est de répondre à cette problématique de formation dans le monde dentaire en développant un simulateur pour l'apprentissage des gestes chirurgicaux odontologiques : le système « Haptik ». Le but de ce système est de permettre à l'étudiant d'apprendre à reconnaître les indicateurs significatifs pour déterminer le geste chirurgical à réaliser et d'améliorer ce geste en pouvant le répéter autant de fois que nécessaire. Plus précisément, le simulateur reproduit les conditions d'une salle de travaux pratiques d'odontologie, où l'apprenant doit réaliser

¹ <http://www.digisens.fr/fr/gamme.php>

virtuellement un exercice. Pour ce faire, le système « Haptik » est composé d'un ordinateur, d'un écran permettant un rendu graphique stéréoscopique des objets (mâchoires, dents, racines), d'une mâchoire en plastique pour se repérer physiquement et d'un bras à retour d'effort à trois degrés de liberté pour les sensations tactiles (Figure 1–1). Les étudiants s'exercent sur un exercice de traitement de carie.

Figure 1–1 : Système « Haptik » de la société Digisens



Le développement de ce simulateur a été assuré par trois ingénieurs durant trois années. La société Digisens a été lauréate du concours national d'aide à la création d'entreprises innovantes du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche en partenariat avec Oséo. Elle a également reçu pour le développement de ce simulateur le prix européen de l'innovation technologique. Ces résultats confirment le caractère innovant de l'entreprise créée par le docteur Curnier dans le monde dentaire. Cependant, malgré les innovations technologiques, le simulateur « Haptik » n'a pas rencontré son marché. Cinq simulateurs en tout ont été vendus aux écoles de chirurgie dentaire de Genève et d'Amsterdam.

3) Une nouvelle approche

A partir d'une analyse des causes de cet échec commercial et des développements technologiques de la société Digisens, Marc des Rieux entreprend en 2007 de créer la société Didhaptic² avec comme objectif de concevoir un simulateur pour la formation à l'implantologie. Cette technique dentaire consiste à fixer dans l'os une racine artificielle en titane supportant une dent prothétique. Elle comprend une phase de planification permettant, à partir d'indicateurs, de prendre une décision sur le type d'implant à poser, et une phase de réalisation concrète de la chirurgie intégrant un ensemble de gestes chirurgicaux. Par conséquent, pour être compétent en implantologie, un dentiste doit être capable de mobiliser un ensemble de connaissances, de ressources et d'habiletés motrices pour résoudre le cas clinique. « Une compétence faisant référence à un ensemble d'éléments que le sujet peut mobiliser pour traiter une situation avec succès » (Jonnaert, 2002, p.31).

²<http://www.didhaptic.com>

En dehors du fait que la formation à l'implantologie présente des risques que des dispositifs de réalité virtuelle peuvent appréhender par des entraînements virtuels avant la réalisation des actes chirurgicaux sur patients réels, deux facteurs principaux ont motivé l'engagement de la société Didhaptic dans ce domaine.

Le premier facteur renvoie au développement de l'implantologie, d'une part dans le domaine de la formation et d'autre part, dans le domaine commercial.

Dans le domaine de la formation, les dentistes sont soumis à une loi européenne les obligeant à se former tout au long de leur carrière. L'association dentaire française note l'évolution du droit de la responsabilité médicale dans ce domaine : « *Traditionnellement, l'obligation du médecin naît du contrat médical qui se conclut entre le patient et lui. Ce contrat met à la charge du médecin, non pas l'obligation de résultat qui consisterait à lui imposer de guérir le malade, mais l'obligation de moyen qui consiste à donner des soins consciencieux, attentifs et conformes aux données acquises de la science [...]* En acceptant de donner des soins à un patient, le chirurgien-dentiste s'engage à ce que ces soins soient éclairés et conformes aux données acquises de la science. C'est dans ce but qu'il s'informe et se forme aux thérapeutiques nouvelles » (Rapport de l'association dentaire française, 2001³). Or en France, il y a 41 116 chirurgiens-dentistes⁴, dont seulement 15 % sont formés à l'implantologie ; ce qui est inférieur à la moyenne européenne, comme le confirme la Figure 1-2 présentant le nombre de dentistes posant des implants dans le monde⁵. Bien qu'il n'y ait aucune obligation réglementaire à disposer d'un diplôme pour poser des implants, les dentistes investissent les formations en implantologie. Selon Lim, Afsharzand, Rashedi et Petropoulos (2005), l'implantologie est la formation la plus demandée par les chirurgiens-dentistes aux Etats-Unis : 84% des praticiens ont positionné en première place l'implantologie dans leurs souhaits de formation. La tendance se confirme en France, comme le montre une étude du Conseil National de la Formation Continue Odontologique : « *les formations en implantologie ont représenté 48% de l'ensemble de l'offre de formation proposée aux chirurgiens-dentistes en 2008* » (La lettre n°81, p.12)⁶.

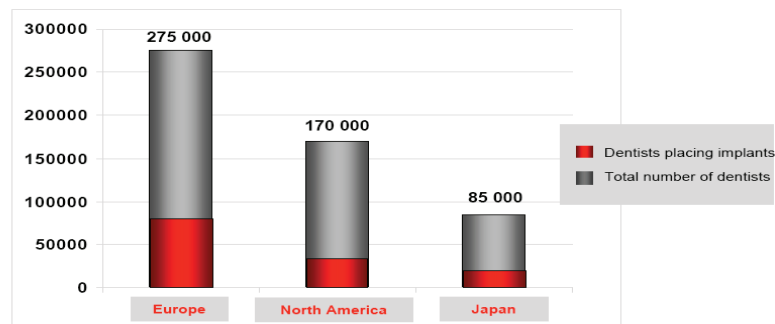
³http://www.adf.asso.fr/cfm/site/thesaurus/detail_conference.cfm?rubrique_origine=47&conference=34/2001

⁴ Au 1 janvier 2009, selon le site de la Confédération Nationale des Syndicats Dentaires: <http://www.cnsd.fr/fr/dossiers/demographie>

⁵ Source : Annual Report 2009 de la société Straumann

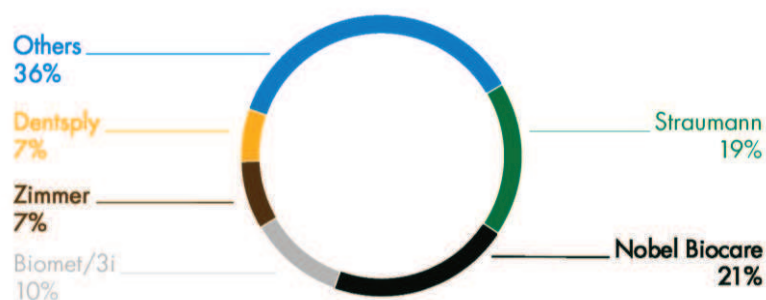
⁶ Etude du Conseil National de la formation Continue Odontologique : http://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/uploads/media/La_Lettre_81.pdf

Figure 1–2 : Nombre de dentistes posant des implants par rapport au nombre total de dentistes en 2009



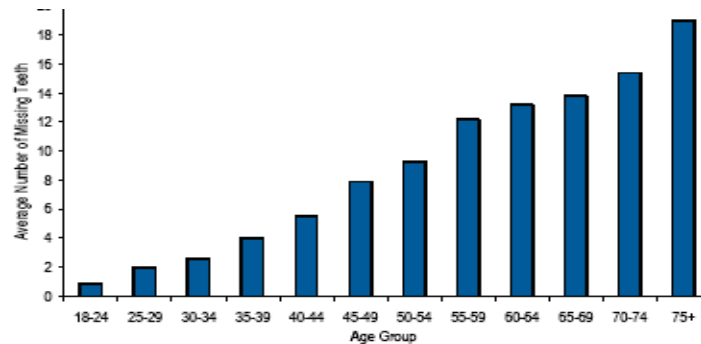
Dans le domaine commercial, le marché mondial de l'implantologie se répartit entre cinq sociétés majeures (Figure 1–3)⁷. La croissance de ces sociétés lors des huit dernières années est d'environ 20% par an. En France, la technique est également en plein essor (+22% en 2002) ; ce qui se traduit par la pose de 110 000 implants dentaires. Pourtant la France est en retard sur l'Allemagne, l'Italie ou même l'Espagne. Dans ces pays, le nombre d'implants placés en 2002 était respectivement de 419 000, 409 000 et 168 000. De plus, deux facteurs indiquent que le marché va continuer de croître. a) L'évolution démographique des zones Amérique du Nord, Europe et Japon, indique que la population des plus de 65 ans va doubler dans les vingt ans à venir. Or comme le montre la Figure 1–4 plus une personne est âgée plus il lui manque des dents. b) La mutation des prothèses traditionnelles vers l'implant. L'ensemble des acteurs professionnels s'accorde à considérer l'implant comme la prothèse dentaire du futur car elle a un taux de réussite de 97%, qu'elle procure un confort supérieur pour le patient, qu'il n'y a pas de barrière pour rejoindre les prix des traitements conventionnels (le prix de l'implant représente seulement 10 à 15% du coût du traitement) et que les mutuelles et systèmes de santé commencent à rembourser la pose d'implant. Or actuellement, sur la zone Amérique du Nord, Europe et Japon, il y a 350 millions de dents manquantes, 110 millions sont traitées (toutes techniques confondues) dont seulement 12 millions par la pose d'implant. Il reste donc à l'implantologie une grande marge de progression.

Figure 1–3 : Pourcentage de part du marché mondial pour les sociétés fabricantes d'implants en 2009



⁷ Annual Report 2009 de la société Straumann

Figure 1–4 : Évolution du nombre de dents manquantes en fonction de l'âge pour les zones Amérique du Nord, Europe, Japon



Le deuxième facteur qui a poussé la société Didhaptic à choisir l'implantologie est le problème de l'enseignement pratique, c'est-à-dire de la formation aux gestes chirurgicaux. Actuellement, l'implantologie n'est pas ou très peu enseignée en formation initiale dans le cursus universitaire dentaire. Par conséquent, cette technique est enseignée via la formation continue, aux chirurgiens-dentistes en activité. Il existe trois grandes catégories de formation continue. Les formations universitaires qui se déroulent sur deux ans et qui donnent lieu à un diplôme universitaire. Des formations privées, de durée variable, sont réalisées soit par des centres de formation soit par des fabricants d'implants. Enfin, d'autres types de formations, de durée variable, sont assurées par des associations de type loi 1901. Malgré la grande variabilité entre les formations en termes de contenu théorique dispensé, de temps de formation ou de pédagogie mise en œuvre, elles utilisent les mêmes méthodes/moyens pour l'enseignement pratique (Figure 1–5), qui présentent toutes des limites :

- a) Travaux pratiques sur mâchoire en plastique. Ce mode d'enseignement consiste à forer des mâchoires en plastique que l'étudiant tient dans sa main ou pose sur la table. Le problème de cette technique, c'est qu'elle ne procure pas un ressenti satisfaisant et propose un environnement décontextualisé qui ne permet pas de reproduire les points d'appuis nécessaires aux gestes chirurgicaux de l'implantologie (Davaranah et Szmukler, 2007).
- b) Travaux pratiques sur cadavre humain ou animal. Cette technique consiste à poser des implants directement sur des cadavres. Et comme le soulignent Batteau, Liu, Maintz, Bhasin et Bowyer (2004), le problème c'est que les animaux n'ont pas les mêmes structures anatomiques que les humains, que les formations avec cadavres humains sont coûteuses, difficiles à organiser, et que les cadavres ne sont pas réutilisables. Face à ces difficultés, le recours au compagnonnage s'est peu à peu imposé dans la profession.
- c) Le compagnonnage. Ce mode d'enseignement consiste à assurer la formation d'un novice sous la conduite d'un expert, en intervenant sur des patients réels et vivants. Cependant, cette solution pose aussi quelques problèmes : disponibilité des experts, absence de formation sur certaines pathologies, risque pour le patient impliqué dans une situation d'apprentissage, formation par des situations non construites à des fins didactiques (Vadcard, 2005).

C'est donc la combinaison d'une activité en fort développement et de problèmes de formation à la pratique qui a conduit la société Didhaptic à s'engager dans la conception d'un simulateur dédié à l'implantologie. L'objectif ultime du simulateur sera d'apprendre à des dentistes diplômés à poser des implants dentaires pour qu'ils soient compétents en situation réelle.

Figure 1-5 : Illustration de l'enseignement pratique en implantologie

Travaux pratiques sur mâchoire en plastique	Travaux pratiques sur cadavre humain ou animal	Compagnonnage
		

Si la société Didhaptic a repris les technologies développées par Digisens, elle s'est aussi attachée à comprendre et expliquer les difficultés rencontrées par cette société dans la phase de commercialisation de son simulateur. Une étude interne de la société Didhaptic a permis d'identifier trois catégories de causes explicatives.

La première est liée à la conception du système « Haptik ». L'ergonomie du poste de travail est constituée de telle sorte que la vision de l'apprenant est délocalisée, c'est-à-dire que l'apprenant doit regarder à un endroit (sur l'écran face à lui) et agir à un autre endroit (sur le bras à retour d'effort) : il n'y a pas de correspondance entre la localisation de la main de l'apprenant dans le réel et la localisation de sa main dans le virtuel. Or dans la réalité, le dentiste regarde là où il agit (vision co-localisée de ses actions). Ce problème d'ergonomie perturbe l'apprenant, car comme le montrent Lécuyer, Congedo, Gentaz, Joly et Coquillart (2010) dans un dispositif où le geste est délocalisé, l'utilisateur n'utilise que très peu (20%) son sens tactile pour guider et réaliser ses actions, il se réfère en grande partie à sa vision (80%), ce qui ne correspond pas à la pratique dentaire, principalement basée sur le ressenti.

La deuxième catégorie renvoie au contenu pédagogique du système « Haptik » : il dispose d'un seul exercice, ce qui limite l'intérêt de l'utilisation d'un simulateur, et de la réalité virtuelle. Il ne contient pas de scénarisation pédagogique, c'est-à-dire un ensemble de situations pédagogiques articulées et progressivement complexifiées permettant d'atteindre un objectif déterminé. Et de manière plus large, il n'y a pas eu de réflexion sur la place que doit occuper le simulateur dans la formation dentaire existante : quand l'utiliser ? Avant ou après l'acquisition des connaissances théoriques ? Comment l'utiliser ? Quelle est la durée optimale d'une séance sur simulateur ? Quelle pédagogie utiliser ?

La troisième catégorie est liée à la notion de transfert d'apprentissage : est-ce que les utilisateurs apprennent avec le simulateur ? Si oui, qu'est-ce qu'ils apprennent ? Et est-ce qu'ils le transfèrent dans la situation de référence, à savoir dans une opération sur patient réel ?

4) Un partenariat

Considérant cette première expérience de la société Digisens, la société Didhaptic a constitué une équipe pluridisciplinaire associant des compétences en informatique scientifique (pour concevoir des algorithmes de simulation mécanique et obtenir un réalisme sensoriel dans les applications), en réalité virtuelle (pour concevoir les périphériques de réalité virtuelle), et en sciences humaines. De plus, la société Didhaptic a développé un fort partenariat avec un centre de formation (le Diplôme d'Université (DU) en implantologie de la faculté dentaire de Brest) et des experts « métiers » en implantologie, ce qui a permis d'inclure dès la conception du simulateur les futurs utilisateurs (professeurs et apprenants en implantologie).

Pour la partie sciences humaines, une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) a été signée entre la société Didhaptic, les laboratoires de recherche Lab-STICC et CREAD hébergé au CERV (Centre Européen de Réalité Virtuelle) et le doctorant Jérémy Cormier (auteur de cette thèse). Plus précisément, l'objectif de la société Didhaptic au travers de cette convention CIFRE est d'aider à la conception du simulateur VirTeaSy⁸ sur la base d'une analyse de l'activité de chirurgiens-dentistes en situation réelle, d'intégrer du contenu pédagogique dans le simulateur et d'évaluer le simulateur.

La société Didhaptic a sollicité une collaboration avec le CERV, car celui-ci dispose de compétences dans le domaine de l'utilisation de technologies de la réalité virtuelle à des fins d'apprentissage (les EVAH : Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain).

5) Conclusion du chapitre et annonce du plan de thèse

L'objectif final de la société Didhaptic est de réaliser un EVAH dédié à l'implantologie, du nom de VirTeaSy. Plus précisément, l'objectif est de permettre à des dentistes diplômés d'apprendre à poser des implants dentaires pour qu'ils soient compétents en situation réelle. Le CERV étant spécialisé dans l'utilisation de la réalité virtuelle à des fins d'apprentissage, la société DIDHAPTIC a sollicité une collaboration via une thèse CIFRE. Nous développons ce travail en sept chapitres.

Nous venons de voir dans ce chapitre, l'origine du projet et la problématique professionnelle de la société Didhaptic qui débouche sur la réalisation de la présente thèse CIFRE.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les technologies de réalité virtuelle pour apprendre, à travers une définition de la réalité virtuelle et des EVAH, une revue de littérature

⁸ VirTeaSy : Virtual Teaching System

des EVAH dans le domaine dentaire, ainsi qu'un modèle de conception des EVAH intégrant les sciences humaines.

Dans le chapitre 3, nous justifions le choix de la didactique professionnelle, pour mener notre analyse de l'activité. Nous revenons également sur les origines, les emprunts et le positionnement de ce cadre théorique ; ainsi que sur sa manière d'analyser le travail et d'identifier les compétences cibles d'un métier. Nous finissons ce chapitre par une revue de littérature des études qui, mobilisant l'analyse de l'activité en didactique professionnelle, ont formalisé des structures conceptuelles de situations supports à la conception ou à l'évolution de dispositifs de formation intégrant des nouvelles technologies.

Dans le chapitre 4, nous présentons notre première étude. Celle-ci consiste à analyser l'activité de chirurgiens-dentistes en situations réelles d'implantologie. Cette étude se déroule en trois temps : analyse de la tâche prescrite, analyse de l'activité, identification de la structure conceptuelle de la situation.

Dans le chapitre 5, nous détaillons comment les résultats dans l'étude 1 permettent d'aider à la conception de l'EVAH VirTeaSy, tant du point de vue « hardware » que du point de vue pédagogique.

Dans le chapitre 6, nous présentons notre deuxième étude. Celle-ci consiste à évaluer l'EVAH développé. Pour ce faire, nous commençons par réaliser une revue de littérature sur les outils et approches utilisés pour évaluer des EVAH dans le domaine dentaire. Puis nous présentons notre étude qui s'appuie sur le cadre théorique du transfert d'apprentissage du virtuel au réel.

Enfin, dans un dernier chapitre, nous concluons cette thèse et proposons des prolongements et des perspectives à ces travaux de recherche.

2e chapitre : Utiliser les technologies de réalité virtuelle pour apprendre

1) Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter notre approche de la conception des EVAH. Nous abordons dans une première partie, un bref apport théorique sur les EVAH en proposant une définition, leur origine, le type de pédagogie mis en place, leurs avantages et limites, ainsi qu'une définition des termes de réalité virtuelle mobilisés au cours de cette thèse. Dans une deuxième partie, nous proposerons une revue de littérature des EVAH dans le domaine dentaire. Nous distinguons trois types de catégorie d'EVAH : les EVAH interaction « clavier-souris », les EVAH interaction « modèle physique », les EVAH interaction « haptique ». Cette revue de littérature nous amènera à la conclusion que la conception des EVAH dans le domaine dentaire se fait grâce à un lien direct entre informaticien et expert métier. Dans une troisième et dernière partie, nous critiquerons ce lien direct entre informaticien et expert métier ; puis nous proposerons une approche qui fait intervenir les sciences humaines dès le départ de la conception ; enfin, nous présenterons deux exemples d'EVAH ayant été conçus selon cette approche.

2) Les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH)

2.1) Définition : des EIAH aux EVAH

La communauté scientifique s'accorde pour employer les termes d'EIAH (Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain) et d'EVAH (Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain) lorsque que l'on parle d'un simulateur utilisant les techniques de la réalité virtuelle et dont le but est l'apprentissage humain (Chevaillier, 2006).

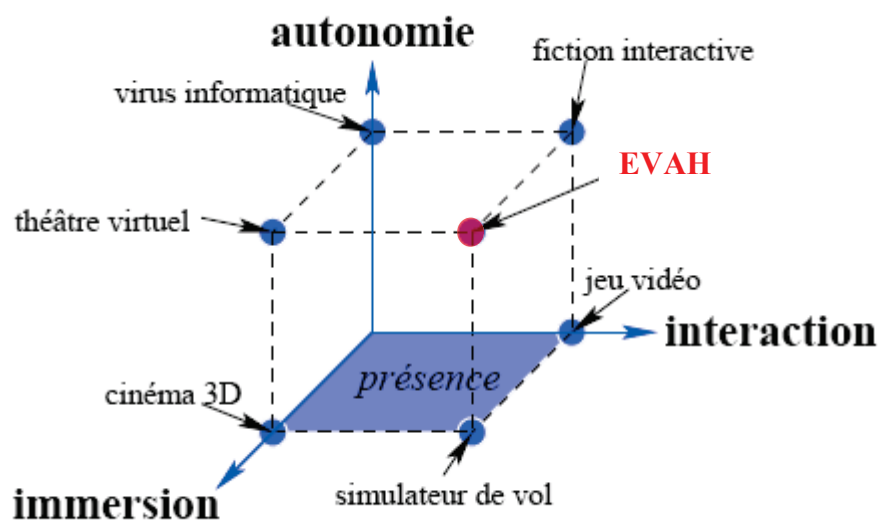
Un EIAH, c'est l'association d'une intention didactique ou pédagogique avec un environnement informatique. Plus précisément, Tchounikine et al. (2004, p.1) définissent un EIAH comme *« un environnement informatique conçu dans le but de favoriser l'apprentissage humain, c'est-à-dire la construction de connaissances chez un apprenant. Ce type d'environnement mobilise des agents humains (élève, enseignant, tuteur) et artificiels (agents informatiques, qui peuvent eux aussi tenir différents rôles) et leur offre des situations d'interaction, localement ou à travers les réseaux informatiques, ainsi que des conditions d'accès à des ressources formatives (humaines et/ou médiatisées)... »*.

Un EVAH est donc un sous-ensemble des EIAH qui utilise les technologies de la réalité virtuelle. La réalité virtuelle peut être définie comme *« un domaine scientifique et*

technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. » (Fuchs P., Arnaldi B., Tisseau J., *La réalité virtuelle et ses applications*, 2003, p.8)

Dans ce contexte, une application de réalité virtuelle se distingue d'une autre application informatique par la sensation d'être dans le monde virtuel et d'y agir. Cette double sensation renvoie à la notion de présence, qui se caractérise par l'immersion et l'interaction. De plus selon Tisseau (2001), un environnement virtuel doit avoir une part d'autonomie, c'est-à-dire qu'il doit pouvoir évoluer sans forcément que ce soit en résultat d'une action de l'utilisateur. Par conséquent, Tisseau et Harrouet (2003) proposent de caractériser une application de réalité virtuelle selon un repère à trois dimensions (Figure 2-1) : *immersion/ interaction/ autonomie*, où les axes ont été normalisés entre 0 (critère totalement absent) et 1 (critère totalement présent).

Figure 2-1 : Caractéristiques de la réalité virtuelle (présence et autonomie) (Tisseau et Harrouet, 2003)



Analysons les trois sommets de ce repère (Buche, Querrec, Chevaillier et Kermarrec, 2006). Une application qui permettrait uniquement à l'utilisateur de se sentir immergé dans un environnement correspondrait au point (1,0,0). L'exemple typique est le cinéma 3D avec un système de son spatialisé et éventuellement des sièges montés sur vérin pour suivre les mouvements du film. Dans une telle situation, l'utilisateur est complètement immergé dans le film mais ne peut agir dessus. Une application qui permettrait uniquement à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement correspondrait au point (0,1,0). L'exemple typique est le jeu vidéo de première génération, comme le célèbre jeu « ping-pong ». Cette application est interactive car joueur et ordinateur réagissent aux actions de l'un et de l'autre, mais le système ne dispose d'aucune autonomie et l'immersion est pour le moins réduite. Enfin, une

application qui évoluerait de manière totalement autonome, sans qu'il n'y ait ni immersion ni interaction avec l'utilisateur correspondrait au point (0,0,1). L'exemple typique serait le virus informatique idéal qui infecterait un ordinateur.

Maintenant, utilisons ce repère pour analyser deux types d'applications qui permettent de faire de la formation.

Premièrement, une application qui allierait de l'interaction et de l'immersion (notion de présence) correspondrait au point (1,1,0). L'exemple typique est le simulateur de vol. L'accent est principalement mis sur le réalisme du rendu associé à une immersion totale et à une interaction performante. Pour ce faire, ce type d'application est composé en majorité de dispositifs réels : le pilote est dans une cabine en tout point identique à une cabine réelle, interagit avec les mêmes instruments que dans la réalité, et pilote un avion dont le comportement est le plus proche possible de la réalité. Cette volonté de réalisme à tout prix et cette absence d'autonomie conduisent, pour ce type d'application, à produire des situations de formation très proches de la réalité. Par conséquent, ces situations de formation ne modifient pas significativement l'approche pédagogique car l'apprenant dispose des mêmes informations. Cependant, elles sont utiles car elles permettent de limiter les coûts économiques et les risques, de simuler des situations rares, et de répéter autant de fois que nécessaire. On parle généralement de simulateur d'entraînement.

Deuxièmement, une application qui allierait les trois dimensions de la réalité virtuelle correspondrait au point (1,1,1) et serait l'application de réalité virtuelle par excellence. Dans un tel système, l'utilisateur est immergé dans un environnement qu'il perçoit par différents sens, il peut expérimenter cet environnement grâce à des actions naturelles ou intuitives, et le comportement de l'environnement ne dépend pas totalement d'un scénario prédéterminé (il évolue plus ou moins indépendamment des actions de l'utilisateur). Par conséquent, pour comprendre l'environnement et interagir avec lui, l'utilisateur doit « s'en construire une représentation mentale afin de calculer soi-même son propre comportement » (Buche et al., 2006, p.66). Quand ce type d'application est utilisé pour former des humains, on les désigne sous le terme d'EVAH (Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain). C'est dans cette dernière catégorie que nous nous situons. À la différence des simulateurs d'entraînement, un EVAH est principalement constitué de dispositifs virtuels. Ce qui induit l'avantage de pouvoir se détacher du réalisme quand cela permet d'améliorer l'apprentissage. Par conséquent, le concepteur de l'EVAH pourra choisir avec plus de liberté les informations à présenter, ainsi que les situations, dans le but de favoriser au maximum l'apprentissage de l'utilisateur.

Ce repère fournit un cadre de positionnement qui est relatif et imprécis, mais qui permet néanmoins d'identifier de quel sommet une application est la plus proche. L'EVAH idéal dispose pleinement des trois critères, mais dans la réalité, certains EVAH exploitent plus ou moins la composante « autonomie », alors que d'autres sont plus ou moins interactifs ou immersifs. Cependant, tous font partie de la catégorie des EVAH.

Finalement, l'objectif des EVAH est de permettre aux utilisateurs d'apprendre en interagissant avec des objets virtuels de la même manière qu'ils interagiraient avec des objets

réels. Les EVAH peuvent être utilisés pour l'enseignement de diverses matières comme l'histoire, la culture, les arts, la géographie, l'astronomie, la chimie et la physique, la médecine, etc. Leur potentiel dans le domaine de l'éducation est important car le contenu pédagogique peut être présenté de diverses manières.

2.2) Origine des EVAH

L'origine des EVAH est à chercher du côté des simulateurs d'entraînement. C'est le domaine de l'aviation qui fut le premier à s'intéresser à ce type de simulateur. En effet, Edwin Albert Link a conçu le premier simulateur de vol (Durlach et Mavor, 1995), qui deviendra le précurseur des simulateurs de vol modernes. Ce simulateur breveté en 1929 (Figure 2-2), était composé d'un cockpit en bois et reproduisait les mouvements d'un avion grâce à des soufflets d'orgue qui se gonflaient et se dégonflaient, afin de permettre au simulateur de se pencher selon les trois axes de l'espace. Son objectif était de former au pilotage sans visibilité. Sa cabine, une fois fermée, était totalement obscure, d'où un isolement du pilote et un conditionnement psychologique pour le vol en aveugle. Les éléments du vol étaient restitués sur une carte par l'intermédiaire d'un traceur et pouvaient être analysés lors des phases d'instruction. Malgré son intérêt, l'armée américaine ne disposait pas des budgets nécessaires pour l'acquérir. Il fallut attendre 1934 et le décès de cinq pilotes, à cause de leur manque d'expérience, pour que l'armée américaine se décide à acquérir les simulateurs Link⁹. Le simulateur réduisait le coût des leçons de vol en permettant aux élèves d'apprendre au sol quelques rudiments des habiletés nécessaires au pilotage. L'engin fut ensuite doté d'instruments afin d'apprendre le vol aux instruments. Notons aussi qu'aucun retour visuel n'était présent sur ce dispositif. Le succès du *Link Trainer* fut impressionnant durant la seconde guerre mondiale où l'armée américaine utilisa dix milles simulateurs pour former près de cinq cent mille pilotes (Mestre, 2004).

De nos jours, les simulateurs de vols dérivés de ce premier prototype sont devenus partie intégrante de la formation à l'entraînement au vol : la phase d'apprentissage sur simulateur est devenue obligatoire. Ils servent à l'instruction au sol, ils possèdent un tableau de bord commandé par des logiciels, un cockpit et des systèmes de mouvement et de visualisation (Muffler, 1985). Outre la formation au vol, il existe des simulateurs qui permettent de s'entraîner aux tactiques de guerre comme « Authentic Tactical Flight Simulator¹⁰ » ou au vol de ligne comme « Elite Simulation solutions¹¹ » et « Flyit Simulators¹² ».

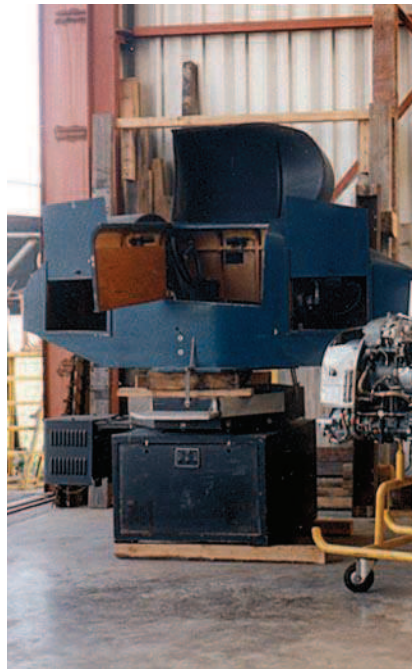
⁹<http://www.louisefantini.ca/RVPage5.html> visité le 08/06/11

¹⁰<http://www.etc tacticalflight.com/index.php> visité le 08/06/11

¹¹<http://www.flyelite.ch/en/index.php> visité le 08/06/11

¹²<http://www.flyit.com/> visité le 08/06/11

Figure 2-2 : Illustration du simulateur Link (1929)



L'objectif de ces simulateurs est triple. Ils permettent : de développer des qualifications significatives avant d'autoriser la formation réelle ; de potentialiser la qualité du temps de formation en vol (utilisation d'avion réel) ; et d'économiser de coûteuses heures de formation en vol.

2.3) Pédagogie utilisée : approche constructiviste

Revenons aux EVAH et au type de pédagogie mobilisé. La formation par les environnements virtuels est basée sur l'idée que l'utilisateur apprend et retient mieux les connaissances acquises par la pratique. En effet, pour améliorer l'efficacité de l'apprentissage, les étudiants doivent avoir la possibilité de devenir acteur de la construction des connaissances, grâce à une interaction directe avec les connaissances du domaine. Cette interaction directe est permise dans un EVAH. Cette méthode d'acquisition des connaissances est appelée le constructivisme. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet aux apprenants de réaliser leur apprentissage par eux-mêmes et de se confronter aux conséquences de leurs décisions. Cette approche peut être adaptée à tout type de sujet ou curriculum de formation impliquant les étudiants comme des participants actifs et immergés dans un EVAH. Les étudiants peuvent donc directement se faire une expérience et interagir avec les concepts, principes, règles et procédures du domaine, au lieu d'écouter passivement une information qui leur est donnée par un instructeur.

Dans ce contexte de formation, Farmer (Farmer, Van Rooij, Riemersma, Jorna et Moraal, 1999) classe les apprentissages réalisés dans un EVAH de la manière suivante :

- Apprentissage d'habiletés perceptivo-motrices : ce qui implique une coordination entre un stimulus ou une entrée perceptive reçue de l'environnement et une réponse motrice qui respecte l'entrée reçue.
- Apprentissage de procédures : cela renvoie à l'exécution d'une séquence d'actions pour effectuer une tâche et à l'apprentissage de cette séquence.
- Apprentissage cognitif : c'est la synthèse et l'intégration des différents types d'informations qui ont été acquis par un sujet et qui deviennent compréhensibles.

Au sein de cette approche constructiviste, la littérature distingue trois grandes catégories de pédagogie de mise en situation. La première catégorie est la pédagogie de la méthode des cas. Cette pédagogie propose de traiter le problème d'un scénario prévu. En terme de transposition didactique, l'EVAH cherche une fidélité conceptuelle (et non totale), c'est-à-dire que la situation d'apprentissage doit poser le même problème que la situation de référence. Par contre il n'y a aucune interactivité dans la démarche de résolution : l'apprenant n'a pas d'informations sur les effets de ses actions sur l'évolution de la situation, il dispose uniquement des informations du départ pour traiter le cas. La deuxième catégorie est la pédagogie de la simulation de résolution de problèmes. Cette pédagogie nécessite d'avoir un EVAH fidèle d'un point de vue conceptuel, car l'objectif est de reproduire le problème et non le réel. Mais cette fois, l'interactivité dans la démarche de résolution est forte. Chaque action de l'apprenant se traduit par une modification de la situation simulée. L'acteur peut utiliser les résultats de son action pour s'orienter dans la résolution de problème. Enfin, la troisième catégorie est la simulation de pleine échelle. Ici, l'objectif est d'être le plus fidèle possible à la réalité. L'EVAH tente de reproduire au maximum la complexité du réel. L'opérateur doit mettre en œuvre toutes les dimensions de la compétence pour résoudre le problème. Enfin, l'interactivité dans la démarche de résolution est forte. Chaque action de l'apprenant se traduit par une modification de la situation simulée.

2.4) Avantages des EVAH : dans quelles situations les utiliser ?

Même si les EVAH semblent être particulièrement utiles d'un point de vue éducatif, il est nécessaire de définir les situations dans lesquelles leur utilisation est optimale (Lourdeaux, 2001 ; Silveira, 2004) :

- Les situations dangereuses (risques chimiques ou de radioactivité par exemple) ;
- Les situations où l'observation de la structure interne est importante pour aider à la compréhension (par exemple, le fonctionnement interne d'une machine) ;
- Les situations où l'interaction est importante pour faciliter la compréhension ;
- Les situations qui sont trop complexes pour les méthodes d'enseignement conventionnelles ;
- Les situations où les phénomènes ne sont normalement pas visibles à l'œil nu :
 - Macroscopiques et microscopiques (par exemple, les événements astronomiques et les mouvements moléculaires) ;

- Très rapides et très lentes (par exemple, les explosions et la dérive des continents) ;
- Les situations où il faut expliquer des concepts abstraits et/ou complexes (par exemple, les champs magnétiques) ;
- Les situations qui ne sont pas accessibles ou impossibles à réaliser dans le monde réel ;
- Les situations où les apprenants sont en déficit de motivation, car l'apprentissage sur environnement virtuel entraîne une hausse de motivation chez les étudiants ;
- Les situations nécessitant des analyses réflexives et rétroactives sur la pratique ;
- Les situations où l'apprentissage par ses erreurs est important ;
- Les situations d'apprentissage qui coûtent trop cher à mettre en œuvre dans la réalité ;
- Les situations qui nécessitent de la répétition.

2.5) Mesures et limites des EVAH

Bien souvent lors de la conception d'EVAH, l'accent est mis sur la qualité visuelle et la complexité de l'environnement. Or l'utilité d'un EVAH pour l'enseignement peut être estimée en prenant en compte d'autres types de paramètres comme l'autonomie, la présence, l'interaction ou le transfert d'apprentissage (Buche et al., 2006). L'autonomie permet de déterminer dans quelle mesure un EVAH est capable de réaliser ses propres actions, indépendamment des interventions de l'utilisateur. Un EVAH suit ses propres buts, et peut changer ou ne pas changer de buts en réponse aux actions des utilisateurs. La notion de présence décrit l'impression d'être dans un endroit réel. Pour avoir un bon sentiment de présence, l'utilisateur doit pouvoir interagir avec l'environnement de façon naturelle et intuitive ; et l'interface de l'ordinateur doit devenir imperceptible. L'interaction désigne la capacité de l'utilisateur à effectuer des actions dans l'environnement selon une logique rationnelle. Enfin, la notion de transfert d'apprentissage renvoie à la capacité de réutiliser les apprentissages réalisés dans l'EVAH dans le monde réel.

Malgré les avantages de réalité virtuelle pour la formation, les EVAH présentent encore aujourd'hui des limites. Elles sont essentiellement technologiques car, même si celles-ci permettent de concevoir des environnements de plus en plus réalistes au travers de logiciels et d'interfaces matérielles, il reste des problèmes à résoudre pour assurer une immersion complètement naturelle (Lourdeaux, 2001). En effet, la manipulation d'objets, l'orientation et le mal du simulateur sont autant de facteurs qui peuvent venir perturber l'immersion de l'utilisateur. Concernant la manipulation d'objets, si l'interaction, le retour d'effort, ou la qualité visuelle des images sont inadaptés, alors une tâche simple dans un environnement réel pourra devenir compliquée dans un environnement virtuel. En particulier, s'il y a un temps de latence perceptible entre les actions de l'utilisateur et les informations perçues cela altère sensiblement la capacité de manipulation d'objets. Concernant l'orientation, les restitutions kinesthésiques et la qualité visuelle permettent à l'utilisateur de s'orienter dans les EVAH, si l'un des deux facteurs est défaillant ou que les deux facteurs ne sont pas cohérents entre eux alors l'orientation de l'utilisateur sera perturbée. Concernant le mal du simulateur, de

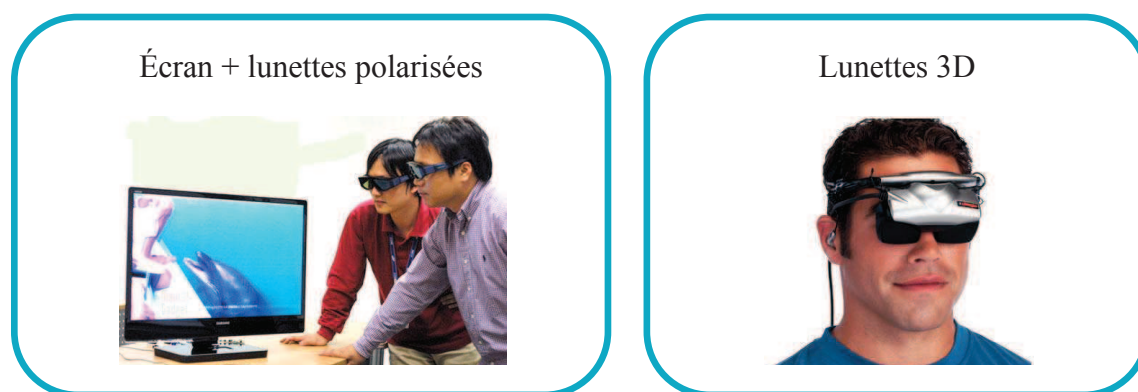
nombreuses études (Draper, Virre, Furness et Gawron, 2001 ; Lin, Duh, Abi-Rached et Furness, 2002 ; Zaychik, Cardullo et Lewis, 2004) ont montré que certaines personnes immergées en environnement virtuel étaient victimes du mal du simulateur. Cela peut être dû à trois raisons (Chevennement, 1998) : *les caractéristiques de l'utilisateur* (âge, sexe, expérience de la tâche, équilibre, etc.), *les caractéristiques du simulateur* (dynamique, statique, temps de latence éventuels, retours kinesthésiques) et *le protocole d'essai* (charge mentale).

2.6) Dispositifs de réalité virtuelle

Dans le but de clarifier notre discours, nous évoquons dans cette sous-partie l'ensemble des termes liés à la réalité virtuelle que nous mobilisons dans cette thèse.

Le rendu graphique correspond à l'image calculée et affichée par l'EVAH. Cette image peut être monoscopique ou stéréoscopique. Le rendu graphique est affiché à l'aide d'un dispositif de visualisation. Pour un rendu monoscopique, les deux yeux voient la même image, un écran cathodique ou LCD¹³ suffit. Par contre pour obtenir un rendu stéréoscopique, chaque œil voit une image différente, les deux solutions couramment utilisées (Figure 2–3) sont 1) un écran avec une fréquence de rafraîchissement suffisamment élevée (120hz) et des lunettes polarisées différemment pour chaque œil ; 2) des lunettes 3D c'est-à-dire des lunettes équipées d'un écran opaque pour chaque œil.

Figure 2–3 : Exemple de dispositifs avec rendu graphique stéréoscopique¹⁴



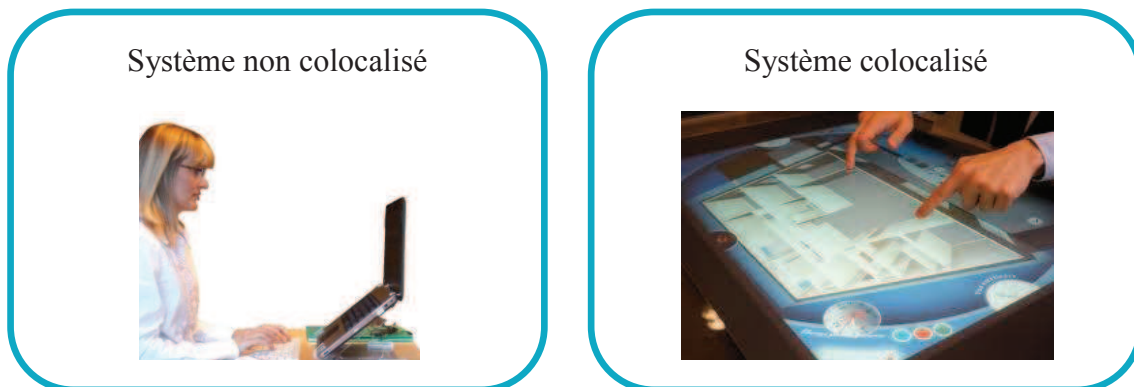
La localisation du rendu graphique peut être ou non colocalisée. Ce terme de colocalisation renvoie à la capacité de l'EVAH à afficher une image que le cerveau va situer, virtuellement à l'endroit où l'objet réel se trouve. En d'autres termes, le rendu graphique (l'image) sera localisé à l'endroit de l'interaction, ce qui permet à l'utilisateur de regarder et

¹³ Liquid Cristal Display

¹⁴ L'image des lunettes 3D correspond au modèle Z800 de la société 3D visor : <http://www.3dvisor.com/> visité le 08/06/11

d'agir au même endroit. L'exemple typique d'un rendu graphique non colocalisé est une interface avec clavier-souris (Figure 2-4) : l'utilisateur interagit à l'aide d'une souris qui se situe sur une table et visualise la représentation de la souris (pointeur) sur l'écran. L'objet réel et l'objet virtuel se situent à deux endroits différents. À l'inverse, l'exemple typique d'un rendu graphique colocalisé est une tablette tactile (Figure 2-4) : l'utilisateur interagit directement sur l'écran à l'endroit où se trouve l'objet virtuel qu'il veut manipuler.

Figure 2-4 : Illustration du type de localisation du rendu graphique



Le tracking (suivi) de tête est un dispositif qui permet d'adapter la vision des objets virtuels aux mouvements de tête de l'utilisateur. Grâce à ce type dispositif (Figure 2-5), si l'utilisateur approche physiquement sa tête de l'écran, l'image est grossie. Inversement, si l'utilisateur éloigne physiquement sa tête de l'écran, alors l'image est vue comme plus petite. Il en est de même pour les déplacements latéraux. Différentes techniques existent, certaines utilisent uniquement une webcam, d'autres utilisent un émetteur-récepteur magnétique, ou encore des marqueurs lumineux (infrarouge).

Figure 2-5 : Illustration de systèmes de tracking de tête



Le périphérique haptique, ou bras à retour d'effort, est un dispositif qui permet à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement virtuel et d'y ressentir l'effet de ses actions

motrices. Les périphériques haptiques, qui nous intéressent, se classent dans la catégorie des périphériques kinesthésiques, c'est-à-dire qu'ils sont capables de détecter une position au sein d'un référentiel et d'appliquer des forces que l'utilisateur ressentira. Ce type de périphérique (Figure 2–6) est classé en fonction de la force maximale développée, de l'espace de travail disponible, et du nombre de degré de liberté¹⁵.

Figure 2–6 : Exemples de périphérique haptique¹⁶



3) Les EVAH dans le domaine dentaire

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la formation en implantologie est basée sur l'utilisation de mâchoire en plastique, de cadavre (animal ou humain) et de compagnonnage. L'utilisation de la réalité virtuelle est encore très peu développée dans ce domaine de formation (Luciano, Banerjee et DeFanti, 2009). Par conséquent, nous allons élargir notre revue de littérature sur l'utilisation de la réalité virtuelle au domaine dentaire (l'implantologie étant une technique dentaire). Pour une revue de littérature des simulateurs médicaux voir (Lui et al., 2003).

Jusqu'au début des années 2000, le domaine dentaire a exclusivement utilisé des méthodes classiques en termes de formation (Smith, 2009). En effet, la grande majorité des travaux pratiques se déroulait sur des simulateurs anatomiques (mannequin composé de dents et d'une mâchoire en plastique) comme le système « DSEplus » de Kavo¹⁷(Figure 2–7). Ce système simule un patient et une unité complète de soins dentaires. L'étudiant peut régler le positionnement du patient, dispose d'un module d'aspiration, d'une alimentation d'eau, de l'ensemble de la trousse implantaire et d'une commande à pied permettant d'activer le moteur

¹⁵ Trois degré de liberté permet au périphérique haptique d'appliquer des forces sur les axes de translation. Six degré de liberté permet au périphérique haptique d'appliquer des forces sur les axes de rotation et de translation.

¹⁶ Images issues du site internet de la société Immersion : http://www.immersion.fr/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=83&Itemid=5&lang=fr visité le 08/06/11

¹⁷ <http://www.kavo.com/Default.aspx?navid=5210&oid=002&lid=fr> Visité le 08/06/11

du contre-angle. Le mannequin est réalisé en caoutchouc et comprend une mâchoire et des dents en plastique sur lesquelles l'étudiant peut s'exercer.

Figure 2-7 : Illustration du système « DSEplus » de la société Kavo



Cependant depuis une dizaine d'années, des applications utilisant la technologie de la réalité virtuelle ont vu le jour dans le domaine dentaire (Smith, 2009). De nombreux auteurs (Johnson, Thomas, Dow et Stanford, 2000 ; Silveira, 2004 ; Luciano et al., 2009 ; Soumya et Ramachandra, 2011) s'accordent pour utiliser une classification des EVAH en trois catégories : 1) EVAH interaction « clavier-souris » ; 2) EVAH interaction « modèle physique » ; 3) EVAH interaction « haptique »¹⁸.

Dans cette partie, nous définirons ces trois catégories et présenterons des exemples d'EVAH. Pour chaque EVAH présenté, nous détaillerons ses caractéristiques et les apprentissages réalisés.

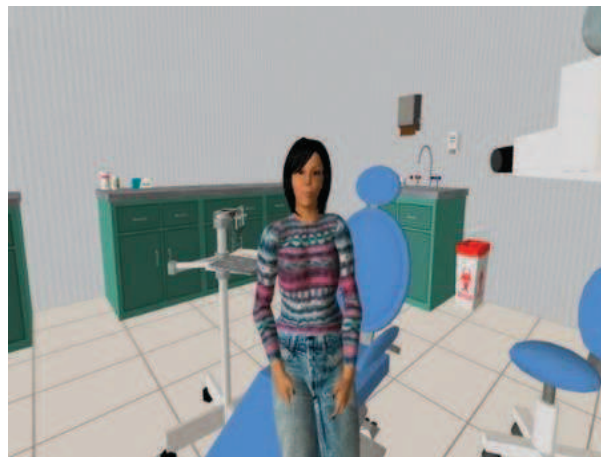
3.1) EVAH interaction « clavier-souris »

Les EVAH basés sur une interaction « clavier-souris » offrent très peu d'interaction avec l'opérateur (clavier-souris), excepté une interface 3D pour la visualisation des données. L'objectif de ces EVAH est de s'entraîner à la prise de décision, et de résoudre des situations problèmes.

¹⁸ Remarque, généralement dans le domaine de la réalité virtuelle, le terme « modèle physique » permet de désigner un modèle numérique qui simule les lois de la physique dans l'environnement virtuel. De plus, les systèmes haptiques (bras à retour d'effort) se basent sur ses modèles physiques pour produire des interactions réalistes avec les objets de l'environnement virtuel. Or dans la classification que nous utilisons, le terme « modèle physique » renvoie à l'utilisation de matériel réel. Par conséquent, l'utilisateur interagit avec de vrais instruments comme par exemple l'utilisation d'une fraise dentaire sur les dents en plastique d'un mannequin. Et le terme « haptique » renvoie à l'utilisation de bras à retour d'effort.

Dans le domaine dentaire, des projets pédagogiques ont été réalisés dans l'environnement virtuel en ligne Second Life¹⁹, notamment le projet Dental Education développé par (Phillips et Berge, 2009). Cet environnement en trois dimensions simule un vaste monde (cabinet dentaire, faculté dentaire, laboratoire préclinique, campus universitaire, ville, etc.) (Figure 2–8). Il permet de combiner les nouvelles technologies de simulation avec les avantages des jeux de rôles, dans le but d'améliorer le diagnostic et le traitement des patients. L'objectif de ce projet est donc de permettre des apprentissages dans le domaine dentaire via un enseignement à distance. Cet enseignement porte principalement sur la résolution de situations problèmes (par exemple, patient ayant des maladies rares) et sur la communication entre le dentiste et le patient (par exemple, argumenter pour pousser un patient à arrêter de fumer). Dental Education est particulièrement utile pendant la première moitié du programme dentaire lorsque les élèves n'ont pas de soins à réaliser sur de vrais patients. L'apprentissage dans Second Life permet également aux étudiants de collaborer que ce soit avec des étudiants du campus ou des étudiants à l'autre bout du monde. De plus, Second Life inclut la possibilité d'utiliser des casques et des micros pour que les utilisateurs puissent entendre les autres avatars de l'environnement d'apprentissage. Par conséquent, des conférenciers peuvent être invités pour expliquer et promouvoir des techniques dentaires. Enfin, Dental Education peut être utile pour les patients car il permet d'informer sur les questions de santé, d'améliorer la compréhension des traitements proposés et donc de mieux les accepter.

Figure 2–8 : Illustration de l'EVAH Second Life (Dental Education)



En implantologie, il existe de nombreux systèmes 3D qui permettent de réaliser de la planification implantaire, c'est-à-dire de choisir les dimensions et le positionnement de l'implant à poser en fonction des caractéristiques du patient. Ces systèmes sont utilisés à la fois dans le cadre de traitement de patient et à la fois et dans le cadre de la formation (utilisation des scanners d'anciens patients pour mettre les étudiant en situation de

¹⁹ <http://secondlife.com/> Visité le 08/06/11

planification). Par exemple le système Robodent²⁰ (Jabero et Sarment, 2006) permet, à partir des informations numériques du scanner d'un vrai patient, de visualiser en 2D les images du scanner selon les trois axes de l'espace, ainsi qu'une représentation 3D de la mâchoire (Figure 2–9). Sur ces différentes vues, le dentiste peut repérer les structures anatomiques importantes et faire des annotations. De plus, le dentiste a accès à une base de données d'implants qu'il peut positionner à sa convenance. Une fois la planification terminée, le système enregistre l'image du résultat.

Figure 2–9 : Illustration du système Robodent



Ainsi, cette catégorie d'EVAH à interaction « clavier-souris » fut la première à se développer, car plus simple d'un point de vue informatique. De plus, concernant la conception, la littérature rapporte uniquement des liens entre expert métier et informaticien. Enfin, il faut noter que ces EVAH ne permettent pas d'apprendre des habiletés motrices. C'est pourquoi des EVAH basés sur une interaction « modèle physique » ont été créés.

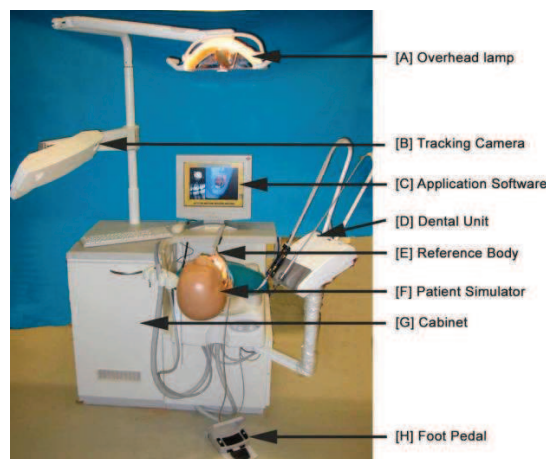
3.2) EVAH interaction « modèle physique »

Les EVAH basés sur une interaction avec un « modèle physique » allient les avantages des simulateurs anatomiques (immersion et interaction avec environnement réel, comme des mannequins par exemple) et les avantages des technologies numériques (capteurs d'effort, de position, de pression, etc.). Ils sont dit « actifs » car ils prennent en compte les actions de l'opérateur. Enfin, ils augmentent l'immersion de l'opérateur grâce aux interfaces haptiques, graphiques (visualisation 3D) et acoustiques. L'objectif de ces EVAH est d'apprendre des habiletés motrices et des connaissances.

²⁰ <http://www.pixtur.org/image/show/350> Visité le 08/06/11

Dans le monde dentaire, le système DentSim (Figure 2–10), développé par la société DenX²¹ (Buchanan, 2001), correspond à ce type d'EVAH. Ce système se compose d'une tête de mannequin, d'une pièce à main, d'une lumière, d'une caméra infrarouge et deux ordinateurs. L'étudiant peut y préparer la planification d'une dent, en obtenir une image virtuelle et la comparer avec la planification idéale de l'enseignant. De plus, la tête de mannequin et la pièce à main contiennent des émetteurs infrarouges. L'ordinateur va donc connaître en temps réel la position et l'orientation de la pièce à main et de la tête de mannequin, ce qui lui permettra d'évaluer les actions de l'apprenant et de fournir des *feedbacks* (Rose, Buchanan et Sarrett, 1999). Le système permet également d'enregistrer les actions de l'apprenant.

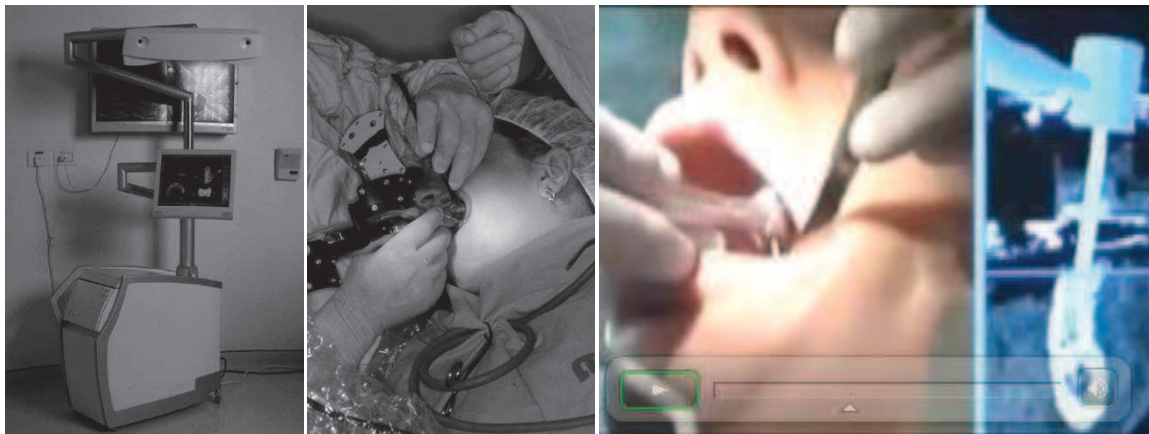
Figure 2–10 : Illustration du système DentSim développé par DenX



En implantologie, le système IGI (Image Guided Implantology), également développé par la société DenX, a une double utilité. D'une part, il permet l'enseignement de la pose d'implant dentaire (Buchanan, 2001) sur mannequin en plastique. En effet, ce système utilise la même technologie que le système DentSim, c'est-à-dire qu'il connaît la position de l'outil du dentiste et de la tête du mannequin grâce à un système de tracking de mouvement (caméra infrarouge). Ainsi, l'unité IGI est capable d'évaluer les actions de l'apprenant en fonction de la planification réalisée. D'autre part, le système IGI est utilisé sur des patients réels (Casap, Wexler, Persky, Schneider et Lustmann, 2004) pour aider les dentistes dans leur intervention chirurgicale en améliorant la précision du geste et en prévenant le dentiste s'il s'éloigne trop de la planification (Figure 2–11).

²¹ <http://www.denx.com/> Visité le 08/06/11

Figure 2-11 : Illustration du Système IGI



Ainsi, cette catégorie d'EVAH basés sur une interaction avec un « modèle physique » fut la première à permettre d'apprendre des habiletés motrices. Du point de vue de la conception, elle est également dans un lien direct entre expert métier et informaticien. Enfin, malgré ces avantages, elle nécessite une grande maintenance, et l'utilisation de consommables. Pour pallier ce problème, des EVAH basés sur une interaction « haptique » ont été créés.

3.3) EVAH interaction « haptique »

Les EVAH basés sur une interaction « haptique » présentent les mêmes caractéristiques que les EVAH basés sur une interaction « clavier-souris » mais sont dotés d'un système de retour d'effort qui permet à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement virtuel et d'y ressentir l'effet de ses actions motrices. L'opérateur est ainsi immergé dans un monde virtuel grâce au périphérique haptique. Ces EVAH permettent d'apprendre des habiletés motrices et des connaissances.

L'avantage des EVAH avec interface haptique est 1) qu'il n'y a pas de modèles physiques à remplacer, par conséquent l'apprenant peut répéter une procédure le nombre de fois qu'il le souhaite ; 2) que le dispositif haptique détecte toutes les collisions avec l'environnement virtuel ainsi que les forces appliquées, ce qui permet de fournir des *feedbacks* objectifs et quantifiables pour l'apprenant et le professeur. En plus de ces avantages, nous montrerons dans le chapitre 6 que les EVAH « haptique » sont utiles pour la formation en dentaire, qu'ils permettent d'apprendre des habiletés motrices aussi bien que sur des mannequins en plastique et que certaines dimensions de l'apprentissage sont transférables (Steinberg, Bashook, Drummond, Ashrafi et Zefran, 2007 ; Luciano et al., 2009 ; Rhiemora et al., 2010b ; Von Sternberg et al., 2007). C'est donc vers cette catégorie d'EVAH que nous souhaitons nous orienter. Par conséquent, nous développerons plus précisément cette partie.

Outre le système Haptik de la société Digisens décrit dans le chapitre 1, nous avons recensé quinze EVAH « haptique » dans le monde. Ces EVAH sont plus ou moins développés, certains sont commercialisés et d'autres servent pour la recherche (informatique ou dentaire). Suite à un travail bibliographique dont l'objectif était d'être exhaustif, nous proposons une catégorisation des EVAH « haptique » en trois points : les EVAH commerciaux, les EVAH conçus pour la recherche en informatique, les EVAH orientés recherche en formation dentaire.

3.3.1) EVAH « haptique » commerciaux

À notre connaissance, il existe cinq EVAH « haptique » commerciaux : Haptik de la société Digisens²², VRDTS (Virtual Reality Dental Training System) de la société Novint²³, Sensable Dental Lab System de la société Sensable²⁴, Dental Trainer de la société Moog²⁵, et Kobra de la société Forsslund System AB²⁶.

Les EVAH Haptik, VRDTS (Buchanan, 2001), et Sensable Dental, proposent d'apprendre à sonder une dent (détection de carie) et à préparer des cavités. Leurs conception est similaire, car ces trois simulateurs utilisent un périphérique haptique « Phantom Desktop » relié à un joystick standard ; un écran LCD qui n'offre pas de rendu graphique stéréoscopique, et une ergonomie globale qui oblige les utilisateurs à interagir à un endroit et à regarder à un autre endroit (système non colocalisé) (Figure 2–12). Ce type d'EVAH ne permet pas de retrouver une position de travail proche de la position de travail en cabinet dentaire.

Figure 2–12 : Illustration d'un EVAH non colocalisé (exemple du système Sensable Dental Lab System)



²² <http://www.digisens.fr/> Visité le 07/06/11

²³ http://home.novint.com/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=181 Visité le 07/06/11

²⁴ <http://www.sensible.com/dental-home.htm> Visité le 07/06/11

²⁵ <http://www.moog.com/markets/medical-dental-simulation/haptic-technology-in-the-moog-simodont-dental-trainer/> Visité le 07/06/11

²⁶ <http://www.forsslundsystems.se/> Visité le 07/06/11

Le système Dental Trainer fut le premier EVAH commercial à proposer la colocalisation, c'est-à-dire que le rendu graphique est virtuellement localisé à l'endroit où l'on agit (Figure 2–13). De plus cet EVAH dispose d'un système de visualisation offrant un rendu graphique stéréoscopique qui permet une meilleure perception de la profondeur. Enfin, le périphérique haptique est relié un véritable outil dentaire, à la place d'être relié au traditionnel joystick. Il faut toutefois noter que cet EVAH n'inclut pas de système de tracking de la tête de l'utilisateur ce qui limite la navigation dans l'espace virtuel et rend imparfaite la colocalisation.

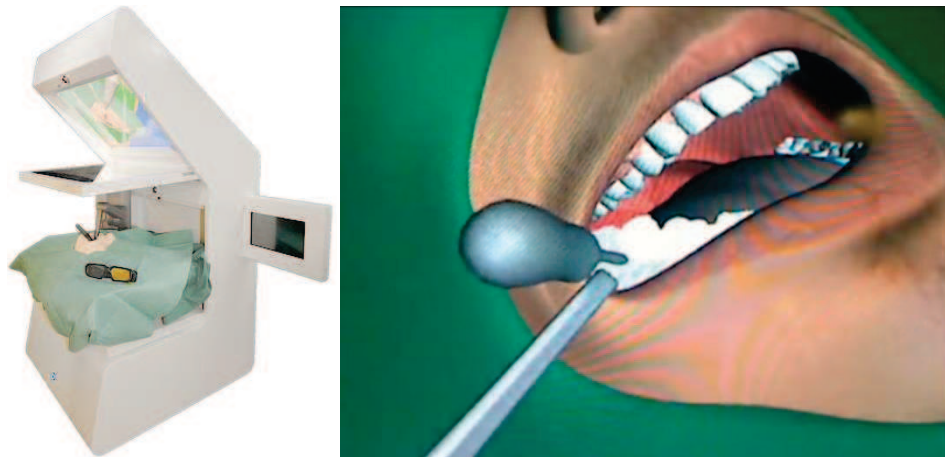
Figure 2–13 : Illustration d'un EVAH colocalisé (exemple du système Dental Trainer)



Le système Kobra (Forsslund, Sallnas et Palmerius, 2009) propose également un système de visualisation offrant un rendu graphique stéréoscopique et colocalisé. L'intérêt de ce système est la possibilité de prendre des points d'appuis sur un mannequin en plastique ce qui permet de se rapprocher encore plus précisément de la position de travail (Figure 2–14). De plus ce système est le seul à simuler un patient virtuel, car tous les autres simulent uniquement une dent ou une mâchoire avec des dents.

Ainsi, au fil des années les EVAH à interaction « haptique » commerciaux se sont améliorés pour passer de systèmes non colocalisés utilisant des systèmes de visualisation offrant un rendu graphique monoscopique et des graphismes sommaires, à des systèmes permettant la colocalisation, un rendu graphique stéréoscopique et des graphismes incluant l'ensemble de la tête d'un patient virtuel. Cependant, ces EVAH n'ont pas rencontré un succès commercial, car le problème principal reste le retour d'effort. En effet, la sensation tactile est encore loin d'être fidèle à la réalité, le périphérique haptique vibre souvent de manière anormale et la majorité des EVAH simulent uniquement des outils de forme sphérique. C'est pourquoi, des chercheurs en informatique travaillent actuellement sur l'amélioration des algorithmes de détection de collision qui permettent le fonctionnement des périphériques haptiques.

Figure 2–14 : Illustration d'un EVAH colocalisé avec point d'appuis sur mannequin, (exemple du système Kobra)



3.3.2) EVAH « haptique » conçus pour la recherche en informatique

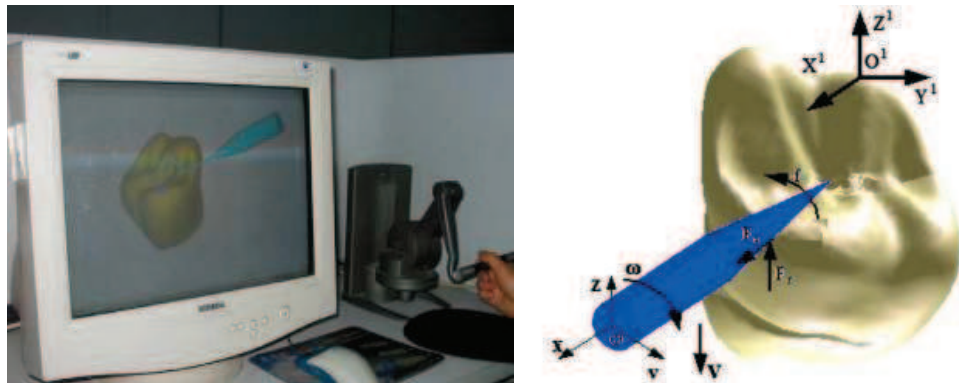
Dans le domaine de la recherche, de nombreux EVAH ont été conçus grâce à une collaboration entre un département d'informatique et un département dentaire d'une même université.

De nombreuses recherches (Kim et Park, 2006 ; Yau, Tsou et Tsai, 2006 ; Liu, Zhang et Townsend, 2008 ; Wang et al., 2009 ; Yoshida et al., 2009) sont orientées informatiques et s'intéressent aux algorithmes de détection de collision nécessaires au fonctionnement du périphérique haptique (Figure 2–15). Le but de ces recherches est de répondre à deux problèmes : 1) la possibilité de simuler des outils de différentes formes ; 2) le réalisme du retour d'effort et des sensations haptiques.

Dans le but de simuler différentes formes d'outils dentaires, le domaine de l'implantologie a également été exploré (Kusumoto et al., 2006 ; Kim et Park, 2009). Ces chercheurs ont modélisé des forets (outil dentaire indispensable à la réalisation de pose d'implant dentaire). Mais ils n'ont pas abouti à la conception d'EVAH « haptique » utilisable pour la formation des dentistes en implantologie.

Enfin d'autres recherches, également en informatique, s'intéressent à la modélisation de patients virtuels ou de dents virtuelles à partir de photographies faciales de vrais patients et de données 3D (Marras, Nikolaidis, Mikrogeorgis, Lyroutdia et Pitas, 2008).

Figure 2–15 : Illustration de l'EVAH conçu par Liu et al. (2008)



Ainsi, les EVAH à interaction « haptique » conçus pour la recherche en informatique s'intéressent uniquement aux algorithmes de détection de collision. De plus ces équipes de recherche ont souvent peu de moyens financiers et un faible attrait pour le graphisme. Cet ensemble de facteurs conduit à des EVAH qui proposent une ergonomie non colocalisée, avec un rendu graphique non stéréoscopique, des graphismes minimalistes et peu ou pas de contenu pédagogique. Ces EVAH ne sont donc pas directement utilisables pour la formation des dentistes. C'est pourquoi des équipes de recherche dans le domaine dentaire ont conçu leurs propres EVAH pour réaliser de la formation au près des étudiants universitaires.

3.3.3) EVAH « haptique » orientés recherche en formation dentaire

A notre connaissance, il existe cinq EVAH « haptique » orientés recherche en formation dentaire : Periosim, IDSS, l'EVAH « Rhienmora », Voxel-Man Dental, Haptel. Nous détaillons précisément ces EVAH car nous aurons besoin de cette description dans le chapitre 6.

3.3.3.1) Periosim©

Periosim© (Steinberg, Banerjee, Drummond et Zefran, 2003 ; Steinberg et al., 2007 ; Luciano et al., 2009) est un EVAH « haptique » conçu par le département dentaire de la faculté de l'Illinois à Chicago. Son objectif est de former aux habiletés motrices de base en parodontie, en diminuant le temps d'intervention des professeurs.

Au niveau matériel, l'EVAH Periosim© est composé : 1) d'un stylet relié à un périphérique haptique (PHANTOM Desktop de la société SensAble Technologies) qui permet de ressentir les différentes structures anatomiques (dent, racine, couronne, gencive). 2) d'un écran cathodique et de lunettes actives (Crystal Eyes Stereo Glasses™) pour obtenir un rendu graphique stéréoscopique des structures anatomiques (illustration 2-18).

En termes d'ergonomie, l'EVAH n'est pas co-localisé. De plus, les différentes parties de l'EVAH sont posées sur une table ou un bureau standard, ce qui ne permet pas de

reproduire la position de travail du dentiste. Enfin, l'EVAH ne dispose pas de système de tracking de la tête de l'utilisateur.

L'objectif de formation de l'EVAH est d'apprendre à détecter du tartre sous-gingival et à ressentir les rugosités sur la surface d'une racine dentaire à l'aide d'une sonde parodontale.

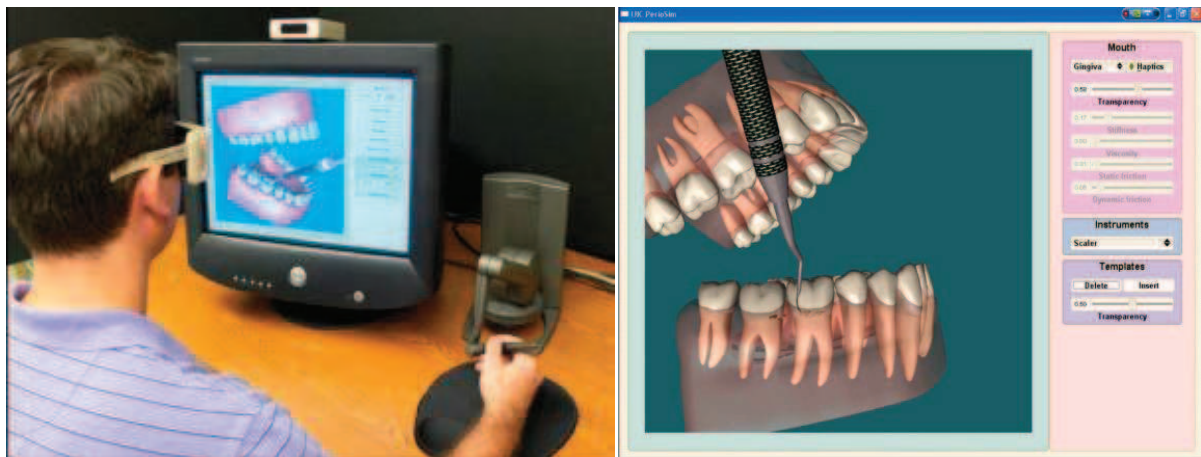
L'interface de l'EVAH dispose de trois onglets : l'onglet « sélection », l'onglet « contrôle graphique », et l'onglet « contrôle haptique ». L'onglet « sélection » permet de sélectionner une dizaine d'instruments parodontaux. L'onglet « contrôle graphique » permet d'adopter différents points de vue sur l'environnement et de régler la transparence de la gencive (Figure 2–16). L'onglet « contrôle haptique » permet de régler la rigidité, la viscosité, et de sélectionner les objets bénéficiant du retour d'effort.

En termes d'« aide », l'EVAH dispose d'une fonction qui indique la force verticale appliquée par l'utilisateur sur le bras à retour d'effort. La littérature ayant fourni des données sur la force verticale à appliquer pour sonder une carie dans le réel, l'EVAH est en mesure d'indiquer à l'utilisateur s'il exerce trop ou pas assez de force.

Enfin, le gros atout de cet EVAH est d'avoir mis au point une méthode pour transmettre une habileté motrice. En effet selon Steinberg, une habileté motrice peut se définir en termes de trajectoires (position et force). L'EVAH est capable d'enregistrer ces trajectoires et de les rejouer. Cette fonction, appelée « jeu haptique », permet donc d'enregistrer les mouvements de l'instrument dentaire sélectionné (position et force). Ceci est particulièrement utile pour enregistrer une procédure réalisée par un professeur, et rejouer cette procédure lorsque l'apprenant tient le bras à retour d'effort. Trois modes sont disponibles. Le mode « observation » qui permet de voir le mouvement de l'instrument dentaire à l'écran. Le mode « apprentissage » qui permet de voir le mouvement de l'instrument à l'écran et de ressentir physiquement les mouvements de l'instrument en tenant le stylet du bras à retour d'effort. Le mode « test » qui permet d'évaluer la procédure réalisée par l'apprenant en fonction de la procédure réalisée par le professeur.

Le contenu pédagogique de cet EVAH permet de développer des apprentissages pour différentes situations (dent normale, présence de pathologie, réalisation de diagnostic et traitement des cas).

Figure 2-16 : Illustration de l'EVAH Periosim©



3.3.3.2) IDSS : Iowa Dent Surgical System

Le département dentaire de l'université de l'Iowa et le laboratoire de représentation graphique de la connaissance (Grok) ont collaboré pour développer le simulateur IDSS (Iowa Dental Surgical Simulator) (Johnson et al., 2000 ; Thomas, Johnson, Dow et Stanford 2001). L'objectif de cet EVAH « haptique » est de procurer des rétroactions visuelles et tactiles pour enseigner des habiletés motrices dans le domaine dentaire et d'aider les professeurs à évaluer l'apprentissage des étudiants.

La conception de l'EVAH met l'accent sur deux aspects : l'efficacité en termes d'apprentissage et le faible coût de conception.

L'EVAH est composé de trois éléments matériels : un ordinateur standard, un système de visualisation, et un périphérique haptique. A l'origine le système de visualisation proposait un rendu graphique stéréoscopique mais compte tenu des limitations de budget et de l'objectif prioritaire (la sensation tactile), l'EVAH dispose désormais d'un rendu graphique monoscopique avec une résolution de 640*480. Le périphérique haptique est un bras à retour d'effort Impulse Engine 2000 de la société Immersion Corporation, relié à un joystick standard.

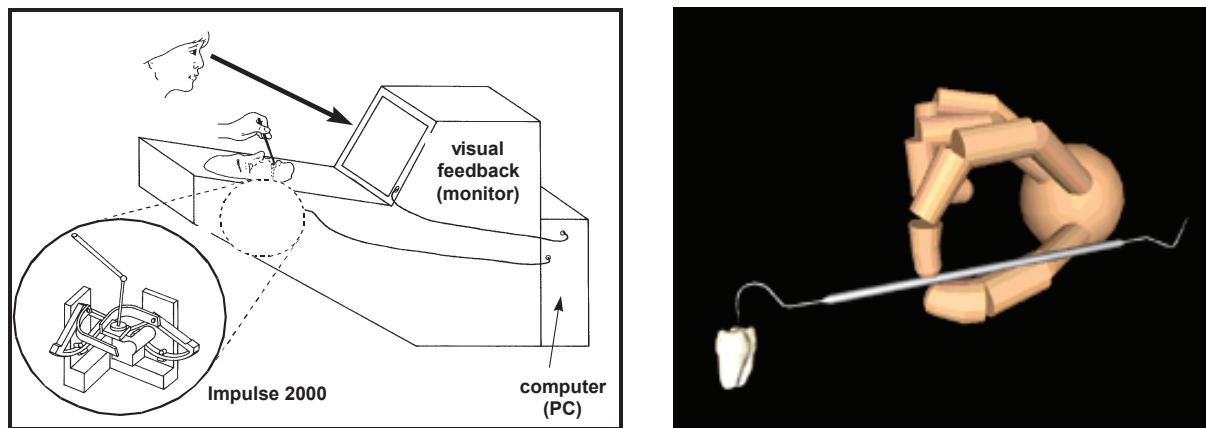
Du point de vue de l'ergonomie (Figure 2-17), nous pouvons faire les mêmes remarques que pour l'EVAH Periosim©, à savoir que l'action n'est pas colocalisée par rapport au regard, que l'ergonomie du poste de travail ne permet pas de reproduire la position de travail d'un dentiste, et que le simulateur ne dispose pas d'un système de tracking de la tête de l'apprenant.

En termes de contenu pédagogique, l'EVAH a pour vocation d'enseigner la sensation tactile permettant de diagnostiquer une carie. Pour cela, l'EVAH simule trois sensations tactiles différentes : émail sain, dent saine, dent cariée.

Enfin, selon Thomas, l'enseignement d'habileté motrice est difficile car les professeurs ont des difficultés à traduire ce qu'ils ressentent en mot, et qu'ils ne savent pas ce que

ressentent les étudiants (notion de force à appliquer). Par conséquent, l'apport principal de cet EVAH est la possibilité d'évaluer quantitativement la force appliquée sur le périphérique haptique. L'EVAH enregistre les forces appliquées par l'utilisateur et les affiche pour que le professeur puisse 1) comprendre la stratégie mise en œuvre par l'apprenant pour explorer les dents, 2) fournir à l'apprenant un *feedback* adéquat et individualisé.

Figure 2–17: Ergonomie et interface de l'EVAH IDSS



3.3.3.3) EVAH « Rhienmora »

L'EVAH « Rhienmora » est un EVAH « Haptique » développé par l'université de Thammasat en Thaïlande (Rhienmora et al., 2010a, 2010b). L'objectif de cet EVAH est de permettre à des étudiants de pratiquer des chirurgies dentaires dans le virtuel.

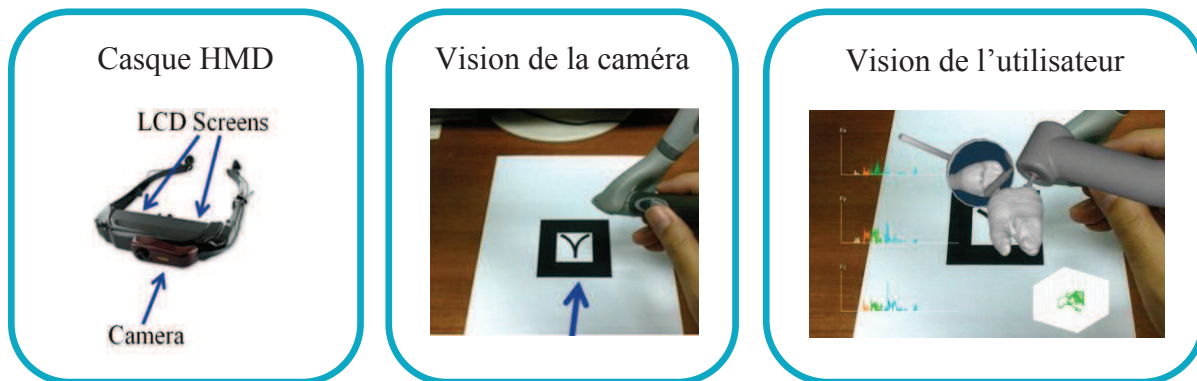
Pour permettre aux apprenants de pratiquer les chirurgies virtuelles dans une posture proche de la position de travail du dentiste en cabinet, et de mettre en avant la coordination œil-main, l'ergonomie de l'EVAH a évolué depuis deux ans. Initialement l'EVAH affichait des images monoscopiques de manière non colocalisée (Figure 2–18), alors qu'aujourd'hui l'EVAH affiche des images stéréoscopiques et de manière colocalisée (Figure 2–18).

Le système actuel fonctionne sur un ordinateur standard (HP 1.6 GHz), à l'aide d'un système de visualisation et d'un périphérique haptique. Le système de visualisation est un casque HMD (head-mounted display) muni d'une caméra frontale. Ce système permet de faire de la réalité augmentée. D'un côté, la caméra filme la scène réelle (main de l'utilisateur, périphérique haptique, et une feuille avec un repère), et de l'autre côté, les écrans du casque HMD donnent à l'utilisateur un rendu graphique stéréoscopique de la scène réelle avec des objets virtuels incrustés (dent virtuelle, évaluation, miroir) (Figure 2–19). L'ensemble du système de visualisation est muni d'un tracking de tête qui permet d'adapter la vision des objets virtuels aux mouvements de tête de l'utilisateur. Le périphérique haptique est un PHANTom Omni de la société SensAble Technologies qui est relié à un joystick standard.

Figure 2–18 : Illustration de l'EVAH "Rhienmora"



Figure 2–19: Système de visualisation basé sur la réalité augmentée



En termes de contenu pédagogique, l'EVAH permet de réaliser diverses interventions dentaires telles que la préparation de couronne et la préparation du chemin d'ouverture d'une dent. L'EVAH est capable de simuler, de manière stable, la détection de collision avec différentes formes de forage (sphérique, conique, cylindrique) ce qui permet de simuler plusieurs types d'outils dentaires. Ceci est une avancée car la plupart des EVAH « haptique » simulent uniquement des interactions avec des outils sphériques.

Au niveau des « aides », l'EVAH dispose d'un tuteur intelligent qui permet de noter chaque essai réalisé. L'EVAH fournit également des *feedbacks* sur les forces appliquées par l'utilisateur à chaque étape de l'intervention. Enfin, cet EVAH dispose de la fonctionnalité de « jeu haptique » qui permet aux étudiants de revivre physiquement une intervention réalisée par un expert. Pour ce faire, l'expert réalise une intervention, l'EVAH l'enregistre, puis l'étudiant tient le périphérique haptique qui va refaire exactement les mêmes mouvements et appliquer les mêmes forces.

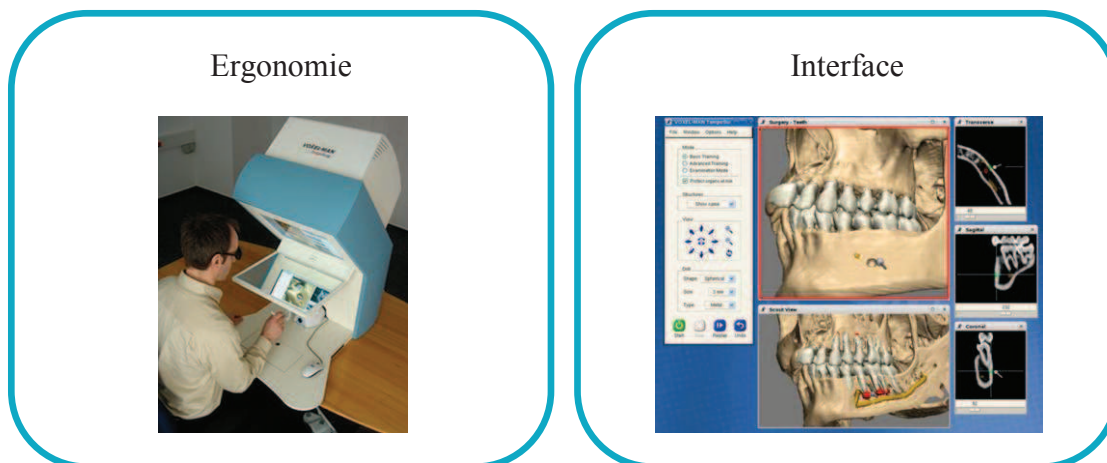
3.3.3.4) Voxel Man Dental

L'EVAH Voxel-Man Dental est un EVAH « haptique » conçu grâce à la collaboration de la société Voxel-Man et de l'université de Hambourg (Heiland et al., 2004 ; Pohlenz et al., 2010). L'environnement virtuel de l'EVAH a été initialement conçu pour des interventions chirurgicales virtuelles de l'oreille, et a ensuite été adapté aux procédures intra-buccales. Bien qu'à l'origine, l'EVAH Voxel-Man Dental ait été conçu par une équipe de recherche, il est aujourd'hui commercialisé par la société Voxel-Man.

Au niveau matériel, l'EVAH est composé d'un ordinateur standard, d'un système de visualisation et d'un périphérique haptique. Le système de visualisation est composé d'un écran CRT (cathodique), d'un miroir semi-transparent et des lunettes actives qui permettent d'obtenir un rendu graphique stéréoscopique. Le périphérique haptique est positionné sous le miroir semi-transparent. Ce périphérique haptique est un PHANTom Desktop de la société Sensable Technologies.

L'ergonomie de l'EVAH (Figure 2–20) correspond à un « Fish Tank », projection d'une image sur un miroir semi-transparent, ce qui permet de voir sa vraie main au milieu de l'environnement virtuel. Le simulateur permet donc une vision colocalisée avec les actions de la main. De plus, cette ergonomie permet d'avoir un champ opératoire presque identique à la réalité en termes d'orientation du patient, de direction du regard du chirurgien dentiste et d'orientation de la main (Figure 2–20). La direction de la vue et le grossissement du champ opératoire peuvent être paramétrés à l'aide d'options.

Figure 2–20 : Ergonomie et interface de l'EVAH Voxel-Man Dental



Pour augmenter l'immersion, l'activation de la fonction forage se fait à l'aide d'une pédale (comme dans la réalité) et le bruit du forage a été ajouté.

En termes de contenu, l'EVAH permet de réaliser une seule intervention : l'apicectomie²⁷. Cette intervention nécessite la simulation de forets de différentes tailles. L'EVAH permet de visualiser l'os, les dents et les nerfs d'un crâne humain. Il ouvre également la possibilité de rajouter des maladies comme une inflammation apicale sur les dents 23, 25, 35, 36. Enfin, l'EVAH permet d'enregistrer le résultat final, ainsi que l'ensemble des étapes de la procédure. De ce fait, les actions erronées peuvent être annulées et l'apprenant peut recommencer l'exercice à partir de l'action erronée. L'EVAH permet également de rejouer de manière visuelle une intervention (enregistrement vidéo de l'intervention).

Au niveau des aides, l'apprenant peut choisir entre trois niveaux : entraînement de base ; entraînement avancé, évaluation. Dans l'entraînement de base, l'apprenant dispose de l'intégralité des aides. Les organes vulnérables sont affichés en couleur, et si l'apprenant en touche un, un signal sonore est émis. L'apprenant dispose également des coupes de scanner (les 3 images en noir et blanc sur la Figure 2–21) pour naviguer dans le forage à travers les trois axes de l'espace. Le « ScoutView » (image du bas sur la Figure 2–21) dévoile l'intégralité de l'anatomie du crâne. Enfin, une liste des objets touchés par erreur est affichée. Dans le mode entraînement avancé, seules les coupes de scanner sont conservées. Dans le mode évaluation, aucune aide n'est conservée, les informations de l'environnement virtuel correspondent aux informations disponibles dans la réalité.

Figure 2–21 : Illustration des trois niveaux d'aides du système Voxel-Man Dental



3.3.3.5) HapTEL

HapTel (Tse et al., 2010) est un EVAH haptique destiné à la formation des étudiants dentaires. Cet EVAH a été réalisé par l'université de Londres (Kings College).

Au niveau matériel, l'EVAH utilise un ordinateur standard, un système de visualisation et un périphérique haptique. Le système de visualisation est composé d'un écran LCD, d'un miroir semi-transparent, et de lunettes actives, ce qui permet d'avoir un rendu

²⁷ L'apicectomie est l'ablation de la partie apicale d'une racine dentaire. Pour réaliser cette opération, il est nécessaire de faire une ouverture dans la gencive et l'os du maxillaire, ce que l'on appelle apicostomie, ou plus exactement apicotomie

graphique stéréoscopique. Le périphérique haptique est positionné sous le miroir semi-transparent. Ce périphérique haptique est un Falcon de la société Novint.

L'ergonomie de l'EVAH (Figure 2–22) correspond à un « Fish Tank », ce qui permet de voir sa vraie main au milieu de l'environnement virtuel. L'EVAH permet donc une vision colocalisée avec les actions de la main. De plus, cette ergonomie permet d'avoir un champ opératoire presque identique à la réalité en termes d'orientation du patient, de direction du regard du chirurgien-dentiste et d'orientation de la main (Figure 2–22). La direction de la vue et le grossissement du champ opératoire sont paramétrables à l'aide d'options. A la différence du système Voxel-Man Dental, l'EVAH HapTEL propose en plus un système de tracking de la tête de l'utilisateur.

En termes de contenu pédagogique, l'EVAH permet de se former au forage de dents, aux soins de caries, à la préparation de cavités et à la restauration de dents. Une pédale permet d'activer les instruments dentaires.

Figure 2–22 : Illustration de l'EVAH HapTEL de Kings College London



Ainsi, les EVAH « haptique » commencent à se développer dans le domaine dentaire et les études que nous présentons dans le chapitre 6 montrent leur efficacité en termes d'apprentissage. Cependant, aucun EVAH de ce type n'a été conçu jusqu'à présent en implantologie. De plus, il faut noter que tous les articles présentent des EVAH à un moment « *t* » mais aucun ne présente le processus de conception. La seule information que nous ayons est la présence de collaborations entre des informaticiens et des dentistes (expert du domaine). Enfin, chaque EVAH est spécifique à une technique dentaire et surtout est spécifique à une

université : il n'y a pas de volonté de généraliser l'EVAH à un ensemble de techniques et à un ensemble de courants théoriques à l'intérieur d'une même pratique dentaire.

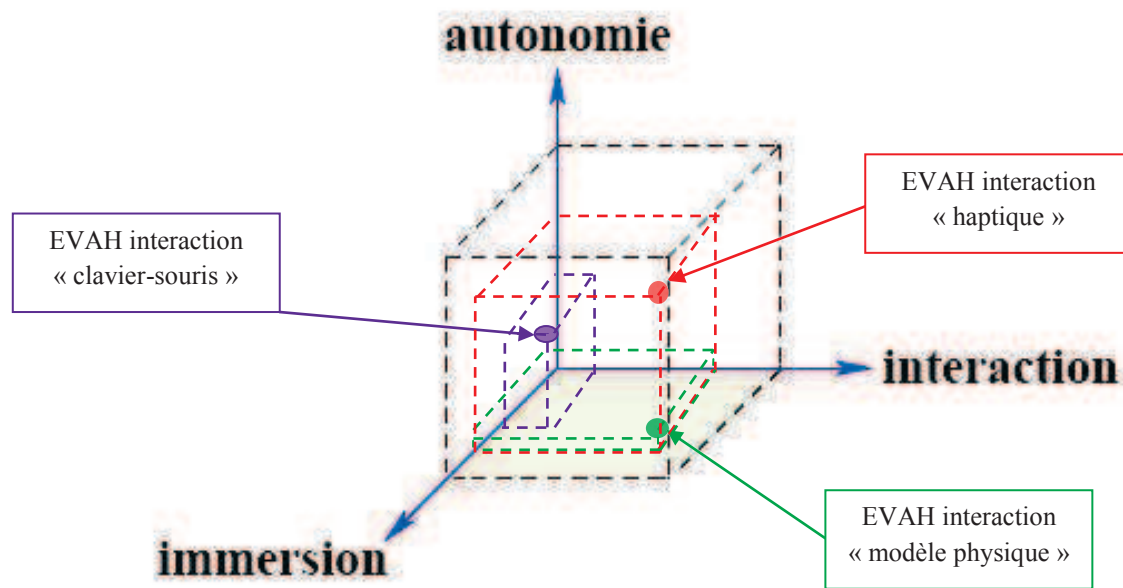
3.3.4) Caractéristiques des EVAH à interaction « haptique »

L'étude de l'ensemble des travaux présentés (Tableau 2-1), nous a permis d'identifier trois éléments importants afin de concevoir un EVAH à interaction « haptique » pour la formation dentaire. 1) L'ergonomie globale du simulateur doit permettre d'adopter une posture opérationnelle (la plus proche possible de la position de travail en cabinet dentaire) (Tse et al., 2010). Ceci impose d'avoir une vision colocalisée avec l'endroit de l'interaction, et de prendre en compte les angles de vues, les espaces de travail, les points d'appuis pour les mains et les doigts. 2) L'EVAH doit procurer des retours sensoriels (Rhienmora et al., 2010a), notamment des retours haptiques qui s'appuient sur des modèles réalistes des objets virtuels ; des retours visuels qui apportent un rendu graphique stéréoscopique des structures anatomiques du patient virtuel ; des retours auditifs qui permettent d'avoir un *feedback* immédiat sur l'action effectuée. 3) Des évaluations en temps réel et *a posteriori* qui permettent à l'apprenant et au professeur d'évaluer objectivement et quantitativement les actions réalisées.

3.4) Classification des EVAH dans le domaine dentaire

Les EVAH dans le domaine dentaire peuvent être classés en trois catégories (Soumya et Ramachandra, 2011) et positionnés de manière relative et imprécise dans le repère de Tisseau et Harrouet (2003) qui mobilise les trois axes de la réalité virtuelle (immersion, interaction, autonomie). Dans ce repère (Figure 2-23), nous plaçons les EVAH interaction « clavier-souris » sur le point (0.5 ; 0.25 ; 0.5) car ils offrent une immersion moyenne grâce à un rendu graphique monoscopique, une faible interaction due à l'interface « clavier-souris » et une autonomie également variable d'EVAH à un autre. Nous situons les EVAH interaction « modèle physique » sur le point (0.75 ; 0.75 ; 0.1) car ils permettent un bon niveau d'immersion grâce aux dispositifs de réalité virtuelle ajoutés (son, visualisation, feedback, etc.), une interaction réaliste grâce aux modèles physiques (ex : mannequin), mais quasiment aucune autonomie car les modèles physiques ne peuvent pas évoluer eux-mêmes, sans interaction avec l'utilisateur et sans suivre un scénario prédéfini. Enfin, nous situons les EVAH interaction « haptique » sur le point (0.75 ; 0.75 ; 0.75) car ils permettent un bon niveau d'immersion grâce aux dispositifs de réalité virtuelle ajoutés (son, visualisation, feedback, etc.), une interaction réaliste grâce aux bras à retour d'effort, et de fortes possibilités d'autonomie ; cette dimension peut encore être améliorée au vu des EVAH que nous avons étudiés.

Figure 2–23 : Illustration du positionnement des EVAH dans le domaine dentaire



Comme en témoigne notre revue de littérature sur les EVAH à interaction « haptique » dans le domaine dentaire, aucun système ne permet de former à l'implantologie. Par conséquent, la conception d'un tel EVAH utilisant un bras à retour d'effort serait une première mondiale. Ainsi dans la prochaine partie de ce chapitre, nous nous interrogerons sur le modèle de conception à adopter pour obtenir un EVAH utile pour la formation.

Tableau 2–1 : Synthèse des EVAH basés sur une interaction « haptique »

Simulateur et objectif	Provenance		Système de visualisation			Périphérique haptique		Système co-localisé
	Université ou société	Comme rcialisé	Type de système	Stéréosc opie	Tracking de tête	Type de bras	Interaction	
EVAH « haptique » commerciaux								
Haptik (Curnier, 2010) : Permettre à l'étudiant d'apprendre à reconnaître les indicateurs significatifs pour déterminer le geste chirurgical à réaliser en odontologie.	Société Digisens	Oui	LCD	Non	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Non
VRDST (Buchanan, 2001) : Enseigner la détection de carie, la préparation de cavité et la restauration de dent.	Harvard/ société Novint Technology	Oui	LCD	Non	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Non
Sensible Dental : Enseigner la détection de carie, et la préparation de cavité.	Société Sensable	Oui	LCD	Non	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Non
Dental trainer (Simodont) : Enseigner la détection de carie, et la préparation de cavité.	Société Moog	Oui	Mini Fish Tank	Oui	Non	Développé par Moog	Outil dentaire	Oui
EVAH Kobra (Forsslund et al., 2009) : Enseigner la détection de carie, et la préparation de cavité.	Société Forsslund System AB	Oui	Fish Tank	Oui	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Oui
EVAH « haptique » conçu pour la recherche en informatique								
Kim et Park (Kim et Park, 2006) : Recherche sur les algorithmes de détection de collision permettant de simuler différentes formes d'outils dentaires.	Korea Institute of Science and Technology	Non	Fish Tank	Oui	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Oui
Lui (Lui et al., 2008) : Recherche sur les algorithmes de détection de collision permettant de simuler différentes formes	Pékin (Chine)	Non	CRT	Non	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Non

d'outils dentaires.								
Wang (Wang et al., 2009) : Recherche sur les algorithmes de détection de collision permettant de simuler différentes formes d'outils dentaires.	Pékin (Chine)	Non	Fish Tank	Oui	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Oui
HHDTs (Yoshida et al., 2009) : Recherche sur les algorithmes de détection de collision permettant de simuler différentes formes d'outils dentaires.	Osaka (Japon)	Non	Fish Tank	Oui	Oui	PHANToM Desktop	Joystick	Oui
Marras (Marras et al., 2008) : Modélisation de patients virtuels ou de dents virtuelles à partir de photographies faciales de vrais patients et de données.	Thessaloniki (Grèce)	Non	CRT	Non	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Non

EVAH « haptique » conçu pour la recherche en formation des dentistes

Periosim (Luciano, 2009) : Enseigner des habiletés motrices de base en parodontie, en diminuant le temps d'intervention des professeurs.	Illinois	Non	LCD	Non	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Non
IDSS (Johnson et al., 2000) : Enseigner la sensation tactile permettant de diagnostiquer une carie.	Iowa	Non	LCD	Non	Non	Impulse Engine 2000	Joystick	Non
Simulateur (Rhienmora et al., 2010a) : Préparation de couronne et préparation du chemin d'ouverture d'une dent.	Thammasat (Thaïlande)	Non	HMD réalité augmentée	Oui	Oui	PHANToM Omni	Joystick	Oui
Voxel Man Dental (Pohlenz et al., 2010) : Enseigner l'apicectomie.	Hambourg (Allemagne) / société Voxel-Man	Oui	Fish tank	Oui	Non	PHANToM Desktop	Joystick	Non
HapTEL (Tse et al., 2010) : Enseigner le forage, les soins de caries, et préparation de cavité pour la restauration des dents.	King's Collège (Londres, Angleterre)	Non	Fish tank	Oui	Oui	Falcon de Novint	Joystick	Oui

4) Modèle de conception des EVAH

4.1) Modèle de conception des EVAH dans le domaine dentaire

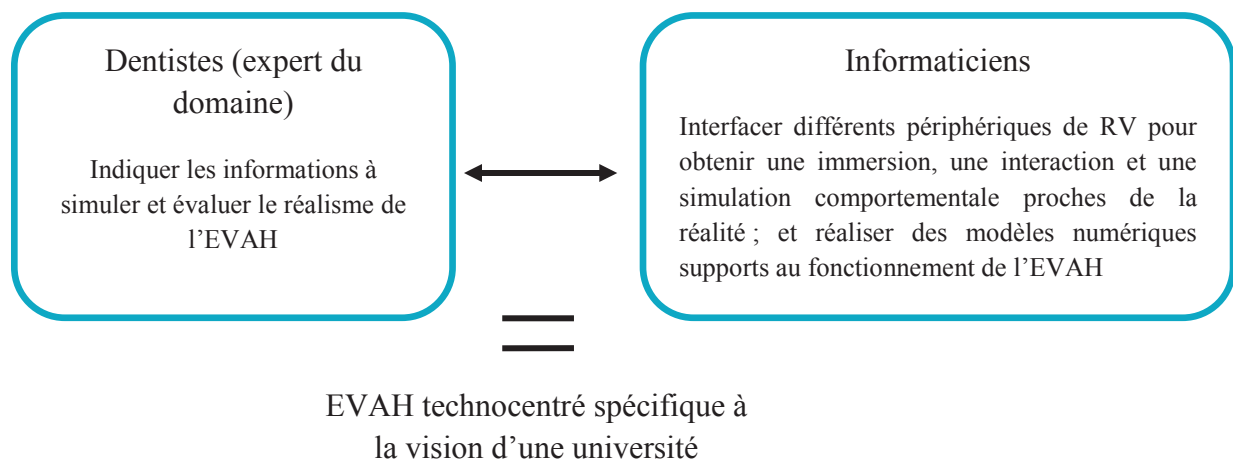
En nous appuyant sur notre état de l'art des EVAH dans le domaine, nous pouvons formuler trois remarques concernant le modèle de conception.

Tout d'abord, peu importe le type d'EVAH réalisé, tous ont été conçus grâce à des collaborations entre des informaticiens et des dentistes (experts du domaine). Le but de ces collaborations est d'une part que les dentistes indiquent aux informaticiens les éléments importants à simuler et d'autre part qu'ils « valident » le réalisme et la pertinence de l'EVAH.

De plus, les EVAH conçus à ce jour sont spécifiques à une technique dentaire, et surtout spécifiques à une université. Par conséquent, ils traduisent la vision d'une université, voire d'un professeur et la question du transfert du résultat de ces travaux à d'autres contextes applicatifs ou de recherche n'est pas explicite. Or un EVAH conçu pour une technique particulière et par une université ne conviendra pas forcément une autre université ou à un centre de formation privé.

Enfin, il faut noter que les informaticiens mobilisés dans ces collaborations appartiennent à deux catégories. Les premiers sont des ingénieurs (en mécanique, électronique, informatique) qui ont une vision technique d'un EVAH car leur métier consiste, entre autres, à interfacier différents périphériques de réalité virtuelle pour obtenir une immersion, une interaction et une simulation comportementale qui soient le plus proche possible de la réalité (Fuchs et al., 2003). Cette orientation est porteuse d'un risque d'une conception technocentrée des EVAH (Figure 2–24). Les deuxièmes sont des chercheurs en informatique qui s'intéressent à la réalisation de modèles numériques, par exemple pour simuler l'effet de l'interaction d'un instrument dentaire virtuel sur une dent virtuelle. Ils s'intéressent donc à ce qui permet de faire fonctionner l'environnement virtuel et le périphérique haptique, mais pas aux questions de pédagogie et d'usage, comme peuvent le faire des chercheurs informaticiens dans le domaine des EIAH et des EVAH. Par conséquent, dans les deux cas, les informaticiens mobilisés dans les collaborations pour concevoir les EVAH dans le domaine dentaire ont des préoccupations centrées sur l'EVAH et non sur l'utilisateur et son apprentissage.

Figure 2–24 : Démarche de conception des EVAH dans le domaine dentaire



Bien que la qualité de fidélité technique d'un EVAH soit un facteur important, cela ne suffit pas à assurer une construction de compétences. En effet, le réalisme de l'EVAH n'est pas le critère principal pour assurer l'efficacité d'une formation sur EVAH (Grau, Doireau et Poisson, 1989). Ce sont les conditions d'utilisation de l'EVAH, les caractéristiques des situations didactiques construites ainsi que la gestion de ces situations par les instructeurs qui sont primordiales (Sarmurçay et Rogalski, 1998).

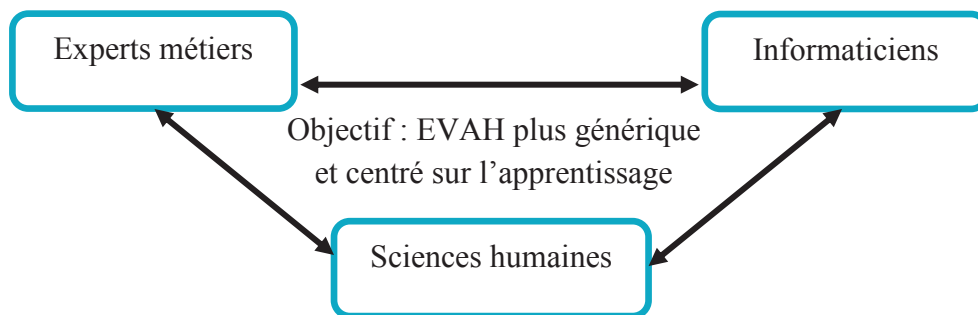
De plus, Farmer et al. (1999) montrent que dans bon nombre de cas les utilisateurs finaux (apprenants) sont les derniers à être associés au cycle de conception et que les spécialistes des sciences humaines sont seulement sollicités pour évaluer les EVAH alors qu'ils devraient y être associés depuis le début (Joab, 2006).

Enfin, la littérature indique une évolution des préoccupations. On est passé d'une vision centrée sur la machine et l'environnement : « *les premiers simulateurs étaient des dispositifs qui essayaient de reproduire les plus importantes caractéristiques des systèmes opérationnels contrôlés par une ou plusieurs personnes, et de l'environnement de ces systèmes. Leur fonction était de fournir des repères appropriés et des capacités de réponse...* » (Flexman et Stark, 1987, p.1013) à une vision où l'analyse psychologique des problèmes posés par la simulation devient première « *le but de toute simulation utilisée pour la formation est de maximiser le transfert à la vraie tâche dans son contexte normal. Le problème-clé est donc de décider quelles caractéristiques de la tâche devraient être représentées dans la simulation afin d'obtenir un transfert de formation élevé. La simulation doit présenter la tâche à l'apprenant de telle façon que les exigences psychologiques soient celles de la tâche de référence.* » (Patrick, 1992, p.495)

4.2) Modèles de conception des EVAH basé sur les sciences humaines

Pour dépasser les limites des précédents EVAH dentaires et concevoir notre EVAH pour l'implantologie, nous avons décidé de casser ce lien direct entre l'expert métier et l'informaticien en utilisant une approche qui inclut les sciences humaines dès le départ de la conception de l'EVAH (Tchounikine, 2002). Le but des sciences humaines sera donc de faire le lien entre les informaticiens et les experts métiers (Figure 2–25). Ce qui permettra, d'une part de concevoir un EVAH qui soit centré sur l'apprentissage et non sur la technologie, et d'autre part de sélectionner un panel d'experts métiers d'horizons différents pour concevoir un EVAH aussi générique que possible.

Figure 2–25 : Modèle de conception intégrant les sciences humaines



Ce modèle de conception a déjà été utilisé pour de nombreux EVAH comme par exemple ARéViRoad et CoPeFoot.

L'EVAH ARéViRoad (Herviou et Maisel, 2005) vise la formation aux habiletés perceptives et cognitives pour la sécurité routière. Plus précisément, c'est un simulateur de trafic routier qui n'est pas centré sur la simulation d'un seul véhicule (celui de l'apprenant) mais sur un trafic routier. Ce projet part du principe que si l'apprentissage des gestes techniques de conduite automobile est bien maîtrisé, il n'en va pas de même en ce qui concerne celui des comportements permettant de bien conduire au milieu d'un flot dense de véhicules. ARéViRoad permet donc de simuler en temps réel plus de cinquante véhicules contrôlés par des conducteurs virtuels autonomes. Le modèle de ces conducteurs virtuels permet de reproduire un certain nombre de comportements, tant au niveau de la conduite (par exemple, respect ou non du code de la route) qu'au niveau de la prise d'informations visuelles. Les différents modèles de comportements implémentés sont issus d'une analyse de l'activité de conducteurs automobiles en situation réelle, analyse réalisée par des chercheurs en sciences humaines. Ces mêmes chercheurs ont également participé à la conception d'une interface destinée au formateur qui permet de créer des situations routières complexes, crédibles et d'y plonger un ou plusieurs apprenants, afin de leur apprendre à reconnaître des situations à risque, à les éviter et si nécessaire à réagir correctement. Finalement, la conception de cet EVAH a été validée grâce à une étude (Le Pallec et al., 2007) qui a comparé des sujets réalisant le même parcours en situation réelle et en situation virtuelle (Figure 2–26). Des

entretiens d'auto-confrontation ont permis d'identifier cinq situations typiques de conduites communes au virtuel et au réel, dont trois présentaient une corrélation statistiquement significative entre le réel et le virtuel.

Figure 2–26 : Illustration de l'EVAH ARéViRoad



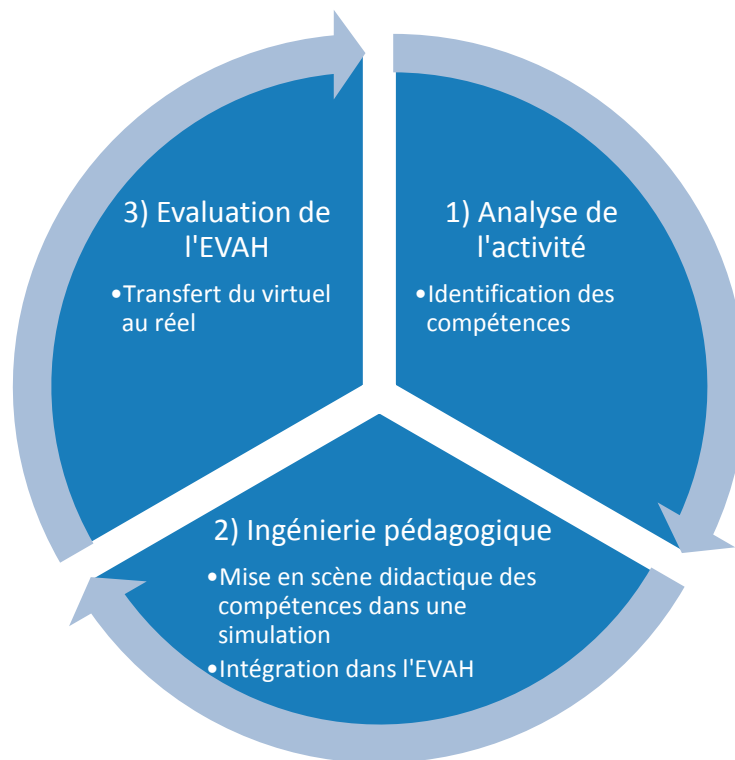
L'EVAH CoPeFoot (Bossard, Kermarrec, Bénard, De Loor et Tisseau, 2009) vise la formation à la prise de décision en situation de contre-attaque en football. Un des axes de recherche de ce projet était d'améliorer la crédibilité des comportements des footballeurs virtuels (personnages contrôlés par l'ordinateur) en termes de prise de décision, et non en termes de graphisme (Figure 2–27). Pour cela, la conception de CoPeFoot s'est réalisée grâce à une collaboration entre les sciences humaines et les sciences de l'informatique. Cette collaboration repose sur quatre étapes, dissociées ici pour les besoins de la présentation, mais qui constituent un processus interactif. 1) Une analyse de l'activité d'experts en situation réelle de contre-attaque en football est réalisée. 2) Cette analyse nourrit le choix et l'implémentation de modèles informatiques pour favoriser la crédibilité comportementale des agents virtuels. 3) Une fois l'EVAH réalisé, celui-ci permet de réaliser des situations pour l'apprentissage de la prise de décision en situation de contre-attaque en football. 4) Pour évaluer l'EVAH, une étude sur la crédibilité des comportements des agents virtuels a été menée. Cette étude, inspirée du test de Turing, demande à des usagers (experts et novices) de distinguer si le joueur est dirigé par un humain ou par un agent virtuel autonome. Les résultats montrent un effet de « leurre » plus marqué chez les novices que chez les experts et une diminution de l'effet de « leurre » au fil de l'expérimentation. Par conséquent, la crédibilité des agents est bonne au départ mais diminue avec l'usage de l'EVAH ce qui souligne l'importance de l'évolutivité des modèles comportementaux implémentés.

Figure 2–27 : Illustration de l'EVAH CoPeFoot



Finalement, dans ce modèle de conception d'EVAH, les sciences humaines vont permettre de réaliser un processus en trois temps : analyse de l'activité ; conception de l'EVAH ; évaluation de l'EVAH. Les sous-parties de chacun de ces temps peuvent varier en fonction des objectifs de l'EVAH. Par exemple, Pastré (1992) propose le modèle suivant (Figure 2–28) : Le premier temps correspond à l'analyse de l'activité du métier cible. Le but de cette phase est de déterminer les compétences nécessaires pour être performant dans le métier cible. Cette phase permet de répondre à la question « à quoi veut-on former avec notre EVAH ? ». Le deuxième temps consiste à déterminer le contenu pédagogique de l'EVAH en s'appuyant sur l'analyse de l'activité de la première phase (« quelles situations d'apprentissage simuler dans l'EVAH ? Quelles aides pédagogiques apporter ? ») ainsi qu'à définir, en interaction avec les informaticiens, les caractéristiques du matériel et du logiciel qui permettront une immersion et une interaction adéquate de l'utilisateur dans l'EVAH. Enfin le troisième temps permet d'évaluer l'EVAH réalisé, en s'intéressant par exemple à la question du transfert d'apprentissage du virtuel au réel.

Figure 2–28 : Apports des sciences humaines dans la conception d'EVAH



5) Conclusion du chapitre

Parmi les différents types d'EVAH étudiés dans ce chapitre (« clavier-souris » ; « modèle physique » ; « haptique »), les EVAH basés sur une interaction « haptique » nous semblent les plus pertinents pour répondre aux problématiques de la formation à l'implantologie et plus généralement aux problématiques de la formation dans le domaine dentaire. Ainsi, depuis une dizaine d'années, ce type d'EVAH s'est fortement développé que ce soit à des fins commerciales, de recherche en informatique ou d'enseignement.

Les EVAH commerciaux permettent une ergonomie colocalisée avec un rendu graphique stéréoscopique ; cependant le retour haptique pose encore des problèmes de sensibilité et de stabilité. C'est pourquoi des chercheurs en informatique essaient d'améliorer les algorithmes de détection de collision et de simuler des outils de différentes formes car actuellement, la plupart des EVAH se limitent à l'utilisation d'outils sphériques pour lesquels les calculs des forces sont plus simples (Rhienmora, Haddawy, Dailey et Khanal, 2008). Les EVAH réalisés dans le cadre de ces recherches manquent de moyens financiers, et ne s'intéressent ni au graphisme, ni à l'ergonomie globale de l'EVAH. Par conséquent, ces EVAH sont difficilement utilisables pour la formation des dentistes. C'est pourquoi d'autres chercheurs ont axé leurs travaux sur des EVAH permettant de former les étudiants dentistes. Leurs questions de recherches portent par exemple, sur l'apprentissage d'habileté motrice, l'utilisation des EVAH dans un cursus de formation, et le type de *feedback* à apporter aux apprenants. Les EVAH utilisés ne sont pas des produits finis comme les EVAH commerciaux, mais ils essaient d'intégrer au fur et à mesure les avancées technologiques des équipes de recherches en informatique.

Malgré ces limites, les EVAH « haptiques » ont fait leurs preuves dans la simulation dentaire restauratrice comme la préparation des caries, le remplissage des cavités, et les procédures parodontales (Rhienmora et al., 2010b ; Buchanan, 2004). En effet, toutes ces études ont montré qu'il est possible d'apprendre une habileté motrice grâce à un EVAH. Cependant, aucun EVAH basé sur une interaction « haptique » permet de former à l'implantologie. La conception d'un tel EVAH utilisant un bras à retour d'effort serait donc une première mondiale.

Du point de vue méthodologie de conception, les études scientifiques présentent des EVAH à un moment « *t* », elles décrivent un produit et non le processus de développement. La seule information apportée par les articles mentionne des collaborations entre des informaticiens et des dentistes (expert du domaine) qui débouchent sur une stratégie de conception technocentrée. Afin de contourner les écueils liés à ce type de stratégie, nous choisissons de mettre en œuvre un modèle de conception incluant les sciences humaines et qui se déroule en trois temps (analyse de l'activité, ingénierie pédagogique, évaluation). La spécificité de notre travail sera d'adapter ce modèle de conception à un EVAH qui portera au moins en partie sur l'apprentissage d'habiletés motrices et où l'analyse de l'activité aura pour but d'identifier la ou les compétences nécessaires pour être performant en situation professionnelle. Par conséquent, la première étape pour réaliser notre EVAH en implantologie

sera de réaliser une analyse de l'activité des chirurgiens-dentistes. Notre prochain chapitre aura pour but de choisir et de développer un cadre théorique support à cette analyse.

3e chapitre : Une approche en analyse de l'activité pour le développement d'EVAH

1) Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons vu que l'objectif final était de concevoir un EVAH pour apprendre en implantologie dentaire. Dans le chapitre 2, nous avons souligné l'originalité de cette entreprise. Nous avons mis en avant que cet objectif nécessitait de disposer d'une méthodologie spécifique de conception de l'EVAH reposant sur une analyse préalable de l'activité d'implantologues lors d'interventions réelles. Dans ce chapitre, nous développons plus spécifiquement cette analyse de l'activité.

Analyser l'activité au travail nécessite de s'inscrire dans une approche théorique de l'activité au travail (Rogalski, 2004), nous en recensons plusieurs : le cours d'action (Theureau, 2009) ; l'action située - la cognition située (Schuman, 1987) ; l'énaction (Varela, 1989) ; la psychologie cognitiviste (Clark et Estes, 1996 ; Gordon et Gill, 1997) ; la psychologie et l'ergonomie du travail (Faverge, 1955 ; Clot, 2000) ou encore, la didactique professionnelle (Pastré, 1999b, 2002 ; Pastré, Mayen et Vergnaud, 2006).

Nous choisissons de mobiliser le cadre théorique de la didactique professionnelle pour trois raisons principales :

1. La didactique professionnelle a pour but d'analyser le travail en vue de former à des compétences, entendue dans cette approche comme une formation qui ne se limite pas à former à des savoirs exécuter mais aussi à comprendre et analyser ce que l'on fait. Cet objectif de formation est celui qui guide la conception de notre EVAH. Pour atteindre cet objectif, la didactique professionnelle procède en deux étapes : a) analyser une situation professionnelle typique du travail considéré et, b) construire des contenus de formation correspondant à l'analyse de cette situation typique du point de vue des compétences à acquérir. L'analyse de l'activité en didactique professionnelle est donc considérée comme un moyen pour le chercheur d'étudier les compétences en vue de les faire acquérir grâce à la construction de contenu de formation. Cet objectif correspond à notre approche de la conception d'EVAH ;

2. L'origine de la didactique professionnelle se situe dans la rencontre de deux courants théoriques (Pastré, 2002) : la psychologie du travail (Faverge, 1955 ; Leplat, 1985) qui a mis en évidence la dimension cognitive existant dans tout travail et le courant théorique de la conceptualisation dans l'action développé par Vergnaud (1992), à la suite des travaux Piaget, dans le cadre de la psychologie du développement. En reconnaissant la place centrale

de la conceptualisation dans l'action dans l'apprentissage d'une compétence, cette approche s'accorde avec l'objectif de notre étude ;

3. Ce cadre théorique a déjà été mobilisé pour la conception d'EVAH comme le simulateur de taille de vigne (Caens-Martin, 1999) ou le simulateur de conduite de centrales nucléaires (Pastré, 1999a).

Le cadre théorique de la didactique professionnelle répond donc au choix de concevoir un EVAH se basant sur une analyse de l'activité dans le but de former des adultes à des compétences grâce à des situations de travail.

Ce chapitre est organisé en trois parties. La première partie s'attachera à présenter les fondements théoriques à l'analyse de l'activité en didactique professionnelle. La seconde partie explicitera la démarche mise en œuvre pour analyser le travail en didactique professionnelle grâce à l'identification de la structure conceptuelle de la situation. Enfin, dans une troisième partie, nous présenterons les études ayant mobilisé le cadre théorique de la didactique professionnelle pour identifier une structure conceptuelle de la situation support à la conception d'EVAH.

2) La didactique professionnelle

La didactique est la science qui vise à comprendre et agir sur les processus qui relèvent de la transmission et de l'acquisition des domaines de savoirs en vue de les améliorer (Samurçay et Pastré, 1998). Le terme « professionnelle » indique que cette didactique est appliquée aux situations de travail. La didactique professionnelle a été formalisée par Pastré (1999b) à partir de deux apports théoriques : la psychologie du travail et la psychologie du développement.

2.1) Psychologie du travail : emprunts et positionnements

La psychologie du travail a mis en évidence la dimension cognitive existant dans tout travail à partir des travaux de Faverge (1955), Leplat (1985) et Savoyant (1979). Tout d'abord, Faverge (Ombredane et Faverge, 1955) a montré que travailler consistait à s'adapter, par une démarche active, aux caractéristiques d'une situation. Ses travaux ont aussi identifié que le travail comportait une part de diagnostic de situations, de résolution de problèmes, de planification, et de mise en œuvre de stratégies. En cela, les travaux de Faverge constituent une première analyse cognitive de l'activité professionnelle.

Ensuite, Leplat (1985, 2000) a distingué dans le travail ce qui relevait de la tâche prescrite et ce qui relevait de l'activité. Ses travaux ont montré qu'il y avait toujours plus dans le travail réel que dans la tâche prescrite et notamment une part irréductible de création et

d'adaptation aux événements. Leplat ne reste pas dans une opposition frontale « travail prescrit » vs « travail réel », il introduit un troisième terme : « la structure cognitive de la tâche » traduisant l'idée que des dimensions objectives de la tâche orientent l'activité des sujets. Dans cette perspective, analyser le travail revient à analyser le couple situation-activité, la situation intégrant la tâche prescrite et la structure cognitive de la tâche.

Enfin, Savoyant (1979) a introduit la théorie de Galpérine qui distingue dans l'action au travail trois types d'opérations : a) les opérations d'exécution qui sont visibles ; b) les opérations de contrôle qui sont également visibles et, c) les opérations d'orientations qui sont peu visibles mais qui correspondent au noyau central de la compétence c'est-à-dire, aux traits caractéristiques de la situation qui vont servir à guider l'action. Ces traits correspondent à ce que Savoyant appelle la partie cognitive de l'activité professionnelle. Les opérations d'orientation dépendent aussi de la manière dont l'opérateur se représente les caractéristiques de la situation. Par conséquent, selon Savoyant, travailler correspond à sélectionner certaines dimensions d'une situation pour en faire des éléments organisateurs de son action.

La didactique professionnelle va s'inscrire dans les apports théoriques en psychologie du travail pour développer une analyse du travail en vue de former à des compétences. D'une part, elle va reconnaître la dimension fondamentalement cognitive de l'activité au travail et développer une méthodologie d'analyse du travail articulant une dimension cognitive, prescriptive (situation) et une dimension pragmatique (l'activité). Autrement dit, il s'agit d'associer une analyse de la tâche prescrite à une analyse de l'activité (couple situation-activité). D'autre part, à partir des apports de la psychologie du travail, Pastré (2002) va argumenter qu'être compétent ne consiste pas uniquement à appliquer des connaissances mais bien à sélectionner certaines dimensions de la situation de travail pour en faire des éléments organisateurs de son activité. Ces concepts dits organisateurs de l'action vont fonder l'approche de l'analyse de l'activité en didactique professionnelle. Nous les développons dans la section 2.3 de ce chapitre.

2.2) La psychologie du développement : emprunts et positionnements

Le second ancrage de la didactique professionnelle repose sur les travaux de Vergnaud (1992) dans le domaine de la psychologie du développement. Vergnaud s'est inspiré de deux apports fondamentaux de la théorie Piagétienne du développement :

- « L'action est une connaissance (savoir-faire) autonome » : en effet, si on peut réussir avant de comprendre (décalage temporel), c'est que l'action possède sa propre organisation interne. Par conséquent selon Piaget : 1) l'action est organisée et intelligible, 2) le principe de cette organisation est à chercher à l'intérieur d'elle-même, et 3) c'est le concept de schème qui va permettre de comprendre comment l'action peut être efficace, reproductible, adaptable et intelligible.
- « La prise de conscience constitue un véritable travail de conceptualisation ». En effet, le travail de conceptualisation va permettre à l'individu de passer de la réussite d'une action (coordination agie) à la compréhension de la réussite de son action

(coordination conceptuelle). Ce qui permet au sujet, dans le réel de réaliser des actions matérielles avec des relations de causalité ; et dans la représentation de réaliser des opérations mentales reliées par des implications significatives. Enfin, il faut noter que ce travail de conceptualisation prend source dans l'action, d'où le terme de conceptualisation dans l'action. La conceptualisation, c'est donc ce qui permet au sujet d'extraire de la situation les éléments cognitifs qui assurent à l'action d'être plus stable, plus adaptée à l'environnement, plus cohérente.

Vergnaud introduit l'idée que pour analyser les compétences, il faut analyser l'action efficace. Cette action efficace comporte pour Vergnaud (1992) a) une part d'invariance, de régularité et b) une part de flexibilité, de capacité d'adaptation aux circonstances. Cette double caractéristique renvoie à la notion de schème que Pastré, Mayen et Vergnaud (2006) définissent dans une perspective Piagétienne comme le « *moyen d'assimiler de nouveaux objets et de s'accommoder aux propriétés nouvelles qu'ils présentent par rapport aux objets antérieurement assimilés* » (Pastré et al., 2006, p.149).

La didactique professionnelle rend compte de ces deux dimensions : « *l'action efficace est souplement organisée, autour d'un noyau invariant* » (Pastré, 2002, p.11). Le problème est que si la psychologie du développement en était restée à la notion de schème telle que définie ci-dessus, il n'aurait pas été envisageable pour Pastré de s'en inspirer pour analyser le travail car il manquait à la théorie Piagétienne une prise en compte des situations et de leurs caractéristiques. En effet, Piaget (1967) envisage le développement (c'est-à-dire la constitution d'outils de pensée, d'invariants opératoires qui vont constituer les conditions de possibilité des apprentissages) comme un processus de maturation génétique interne : le développement cognitif est assimilé au développement d'un sujet épistémique et les apprentissages concrets sont des applications de ce développement génétique structural. Par conséquent, le travail ne permet pas le développement, il en fournit juste l'occasion.

Vergnaud va faire évoluer les travaux initiaux de Piaget en conservant uniquement la théorie des invariants opératoires de Piaget et rejetant sa théorie du développement des stades cognitifs qui prennent fin à l'adolescence. De plus, il va accorder une place importante aux situations dans lesquelles les schèmes se forment et évoluent.

Ainsi Vergnaud propose l'évolution de la définition du schème qui se transforme en un couple schème-situation fondateur d'un processus d'apprentissage par adaptation active. On passe ainsi d'une psychologie génétique à une psychologie qui inclut la médiation avec autrui. Cette évolution est permise d'une part par la généralisation de l'usage du concept de schème à toutes les situations où l'action d'un sujet est organisée, avec régularité et souplesse. Le schème devient « *une organisation invariante de la conduite pour une classe donnée de situations* » (Vergnaud, 1996, p. 283) où, ce qui est invariant c'est l'organisation de la conduite, et non la conduite elle-même car un même schème peut engendrer des conduites relativement différentes en fonction des situations singulières auxquelles il est confronté. D'autre part, grâce à la distinction de quatre composantes du schème, alors que Piaget le voyait comme un bloc indécomposable : a) des buts et des sous-buts ; b) des règles d'action de type *si... alors...* qui permettent de générer la suite des actions du sujet ; c) des invariants

opératoires qui pilotent la reconnaissance par le sujet des éléments pertinents de la situation, et la prise d'information sur la situation à traiter ; d) des inférences en situation qui permettent de « calculer » les règles et les anticipations à partir des informations et du système d'invariants opératoires dont dispose le sujet.

Dans ces quatre composantes, c'est la notion d'invariants opératoires qui va particulièrement intéresser la didactique professionnelle. En effet, cette notion d'invariants opératoires renvoie à la notion de connaissances en acte (connaissances dans l'action) et représente la partie la plus cognitive du schème permettant de sélectionner, d'interpréter, et de traiter l'information pertinente dans une situation. Ces invariants opératoires sont donc des dimensions de la situation qui sont pertinentes pour l'action et exprimées par des indicateurs, même si parfois ceux-ci ne représentent que des détails. Ils structurent l'activité et guident l'action en permettant un diagnostic précis de la situation (Samurçay et Pastré, 1995). Il existe trois types d'invariants opératoires.

- Les invariants de type « propositions » qui sont susceptibles d'être vrais ou faux, et qui renvoient à la notion de théorème-en-acte. Ils représentent la manière dont les individus pensent le réel et constituent des principes (implicites) qui fondent et autorisent les règles d'action et les stratégies.
- Les invariants de type « fonction propositionnelle » qui ne sont pas susceptibles d'être vrais ou faux, mais qui constituent des briques indispensables à la construction des propositions. Ils renvoient à la notion de concept-en-acte. Ils retiennent de la situation les objets, les relations, et les propriétés qui permettent de s'ajuster : c'est ce qui permet de prélever l'information juste (pertinente) pour agir.
- Les invariants de type « argument » qui permettent de donner une valeur aux invariants de type « fonction propositionnelle ». Par exemple, en mathématiques les arguments peuvent être des objets matériels, des personnages, des relations, des nombres, et des propositions.

Le cadre théorique de la conceptualisation dans l'action s'est donc construit autour des concepts de schème et d'invariant opératoire, mais réinterprétés dans le cadre de la théorie des situations. Ainsi, les travaux de Vergnaud fournissent le chaînon manquant pour adapter le cadre théorique de la conceptualisation dans l'action à la didactique professionnelle : une méthode pour analyser une classe de situations en identifiant les concepts à mobiliser pour résoudre les problèmes présents dans cette classe.

2.3) Les concepts organisateurs

Nous venons de voir d'une part qu'en psychologie du travail, analyser le travail consiste à analyser la situation (tâche prescrite) et l'activité (le travail réellement réalisé), et qu'être compétent, ce n'est pas appliquer des connaissances mais sélectionner certaines dimensions de la situation de travail pour en faire des éléments organisateurs de son activité. Et d'autre part, qu'en psychologie du développement, l'activité humaine est organisée autour

de schèmes, constitués en partie d'invariants opératoires permettant d'identifier, d'interpréter, et de traiter l'information pertinente dans une classe de situations.

En tenant compte de ses apports, la didactique professionnelle va relier analyse du travail et formation, en proposant d'identifier les compétences à transmettre lors d'une formation. L'analyse du travail portera sur la tâche prescrite, sur l'activité effective et aura pour but d'identifier ce qui permet à un sujet de sélectionner, d'interpréter et de traiter les informations pertinentes dans une classe de situations, ce qui correspond en didactique professionnelle aux concepts organisateur de l'activité. Si cette notion se rapproche des concepts-en-acte, elle représente des particularités qui tiennent de la spécificité des situations professionnelles.

Un concept organisateur est une représentation mentale qui organise l'activité efficace pour le traitement d'une classe de situations. C'est donc une dimension de la tâche qu'un individu doit prendre en compte pour être efficace dans une situation donnée. Pour ce faire, un concept organisateur est constitué d'unités cognitives opérationnelles qui organisent l'action efficace en assurant le couplage entre les indices pris dans la situation, les actions produites et leur signification pour le sujet. Les indices sélectionnés peuvent être des objets, des propriétés d'objets ou des relations entre les objets. De plus, un concept organisateur permet d'extraire des dimensions du réel dans sa globalité pour fonder un diagnostic de la situation (Pastré, 2005a). Ils permettent également à la représentation fonctionnelle de se structurer en se focalisant sur les relations essentielles existant entre les variables de la situation (Samurçay et Pastré, 1995). Finalement, le concept organisateur permet de définir la classe de la situation dans laquelle se trouve l'individu, de diagnostiquer le problème de la situation, d'organiser et de guider l'action efficace, et enfin d'acquérir une représentation (fonctionnelle) structurée de la situation (Pastré, 1999a).

Au sein des concepts organisateurs, on peut distinguer des concepts pragmatiques et des concepts théoriques (ou scientifiques). Il existe trois différences essentielles entre ces deux types de concepts organisateurs (Pastré, 1994) : Premièrement au niveau de leur origine, un concept théorique est d'abord maîtrisé au niveau de sa définition avant de l'être au niveau de son usage. Alors qu'un concept pragmatique est d'abord maîtrisé au niveau de son usage. Il peut rester longtemps implicite. Deuxièmement au niveau de sa relation avec les autres concepts, un concept théorique est intégré dans un réseau conceptuel, qui forme un corps de savoir structuré et cohérent, où il n'y a pas de contradiction en interne. Alors qu'un concept pragmatique n'est pas forcément intégré dans un réseau conceptuel, et s'il l'est, la cohérence entre concepts n'est pas la priorité, il supporte les contradictions. Troisièmement au niveau de sa validité, un concept théorique s'inscrit dans des énoncés qui sont considérés comme vrais, comme universellement valides. Alors qu'un concept pragmatique s'évalue par rapport à son efficacité. Il n'a souvent qu'une validité régionale. Il est considéré comme valide que dans le contexte et dans la classe de situations pour lesquels il a été construit.

Ainsi en didactique professionnelle, pour identifier les compétences à transmettre lors d'une formation, il faut identifier les concepts organisateurs de l'activité car ceux-ci sont le

cœur des compétences et qu'ils permettent de diagnostiquer la situation, de savoir ce qu'il faut faire et de comprendre la réussite de ses actions.

3) Analyser le travail en didactique professionnelle

3.1) La compétence du point de vue de la didactique professionnelle

La didactique professionnelle s'est donnée comme objectif d'analyser le travail en vue de former à des compétences. La notion de compétence a été envisagée sous différents angles. La didactique professionnelle va se positionner par rapport à ces angles (Pastré, 1994). Le premier consiste à sous-estimer les compétences par rapport aux connaissances (Ginsbourger, Merle et Vergnaud, 1992). Le second consiste à dire que la pratique c'est l'application de la théorie. Or bon nombre d'activités mettent en jeu des relations entre savoir (connaissance) et faire (pratique) qui sont infiniment plus complexes. La part d'interprétation de la situation dépasse de loin la simple application d'un cadre théorique préétabli ; quant aux « concepts », ils sont à adapter, à importer ou même à construire.

Dans le cadre de la didactique professionnelle, être compétent c'est savoir exécuter, tout en sachant comprendre et analyser ce que l'on fait. Car c'est la manière la plus judicieuse de pouvoir adapter son mode opératoire à des situations qui risquent de s'éloigner de plus en plus des situations prototypiques, voire de pouvoir affronter des situations inédites.

Pour aller plus loin, on pourrait dire qu'il faut savoir comprendre pour mieux savoir-faire. Or ce savoir comprendre s'acquiert en partie grâce à la conceptualisation de son action, c'est-à-dire grâce au passage de la réussite d'une performance (coordination agie de l'action) à la compréhension de la réussite de sa performance (coordination conceptuelle de l'action (Piaget, 1974). Le sujet va ainsi passer du plan du réel et de l'action au plan de la représentation : les actions sur le réel sont représentées sous forme d'opérations, pouvant être réalisées mentalement, ce qui permet de mettre en œuvre des stratégies d'ensemble, qui peuvent s'étendre au-delà de la situation, vers le futur et le virtuel.

De plus, une compétence n'est pas directement observable (Pastré, 1999b). Pour l'observer, il faut utiliser un indicateur qui est le résultat de l'action, la performance. Mais si on retient uniquement cet indicateur, on réduit la compétence au savoir-faire, au savoir exécuter ; en oubliant que l'on peut réussir une action par hasard, par essais-erreurs, par application systématique d'un mode opératoire standard, par recours empirique à un répertoire de cas rencontrés, dans le passé, ou par l'utilisation d'une représentation conceptuelle de la situation, qui permet jusqu'à un certain point, la généralisation et le transfert. Il existe donc un deuxième indicateur de la compétence, qui est la stratégie mobilisée par le sujet. C'est pourquoi pour analyser les compétences, il faut analyser la performance mais aussi et surtout l'activité, et la manière dont elle est organisée.

La didactique professionnelle, en tenant compte de ces précisions, définit la compétence comme « *un ensemble organisé de représentations (conceptuelles, sociales et organisationnelles) et d'organiseurs d'activité (schèmes, procédures, raisonnements, prise*

de décision, coordination) disponible en vue de la réalisation d'un but ou de l'exécution d'une tâche ». (Samurçay et Pastré, 1998, p. 121). Samurçay et Pastré (1998) émettent deux hypothèses. D'une part, les compétences sont relatives à des situations et classes de situations. D'autre part, le développement des compétences est le produit d'un double processus : a) apport de connaissances opérationnelles socialisées et/ou antérieurement constituées et b) construction de compétences par l'activité propre du sujet.

Finalement, l'identification des compétences à transmettre dans un métier ne va pas de soi. Comme le souligne Samurçay et Pastré (1995) : « *Seule une analyse du travail qui porte sur la tâche prescrite et de l'activité effective permet d'identifier les compétences à transmettre* » (Samurçay et Pastré, 1995, p.16). Les compétences à transmettre étant les « savoirs en actes efficaces » (Rogalski et Samurçay, 1994) c'est-à-dire les concepts organisateurs de l'activité. Pour identifier ces concepts organisateurs, la didactique professionnelle a mis en place une approche de l'analyse de l'activité qui se base sur l'identification de la structure conceptuelle de la situation.

3.2) La structure conceptuelle de la situation

3.2.1) Définition et constituants de la structure conceptuelle de la situation

La structure conceptuelle de la situation a été définie par Pastré et al. (2006) comme l'ensemble des concepts pragmatiques ou théoriques qui permettent de définir une logique de la situation et expliquent l'efficacité de l'action. Elle représente donc le noyau conceptuel qu'il faut prendre en compte pour que l'action soit pertinente et efficace (Samurçay et Pastré, 2004) ainsi que les concepts servant à établir un diagnostic de la situation.

Une structure conceptuelle de la situation est valide pour une situation professionnelle de référence c'est-à-dire, pour une classe de situations de travail qui dans le processus de formation est la cible du développement de compétences (Samurçay et Rogalski, 1998). En d'autres termes, une situation professionnelle de référence est constituée des situations qui sont construites autour des mêmes concepts pragmatiques ou théoriques.

Une structure conceptuelle de la situation est composée de cinq éléments (Pastré et al., 2006) :

- Des concepts organisateurs qui permettent le diagnostic de la situation : concept pragmatique ou théorique ;
- Des variables qui représentent les sous-propriétés des concepts organisateurs et qui permettent de faire le lien entre indicateurs et concepts organisateurs (relation signifiant-signifié) ;
- Des indicateurs, qui sont des observables naturels ou instrumentés, qui permettent de donner une valeur actuelle aux variables et par suite aux concepts organisateurs ;

- Des classes de situations, qui permettent d’orienter l’action en fonction du diagnostic effectué selon la valeur prise par les concepts organisateurs ; et qui vont spécifier le répertoire de procédures (ou de règles d’action) à utiliser ;
- Des stratégies attendues, en fonction du niveau de conceptualisation auquel à accès un opérateur.

L’ensemble de ces relations forment une représentation fonctionnelle et schématique de la situation de la situation professionnelle de référence.

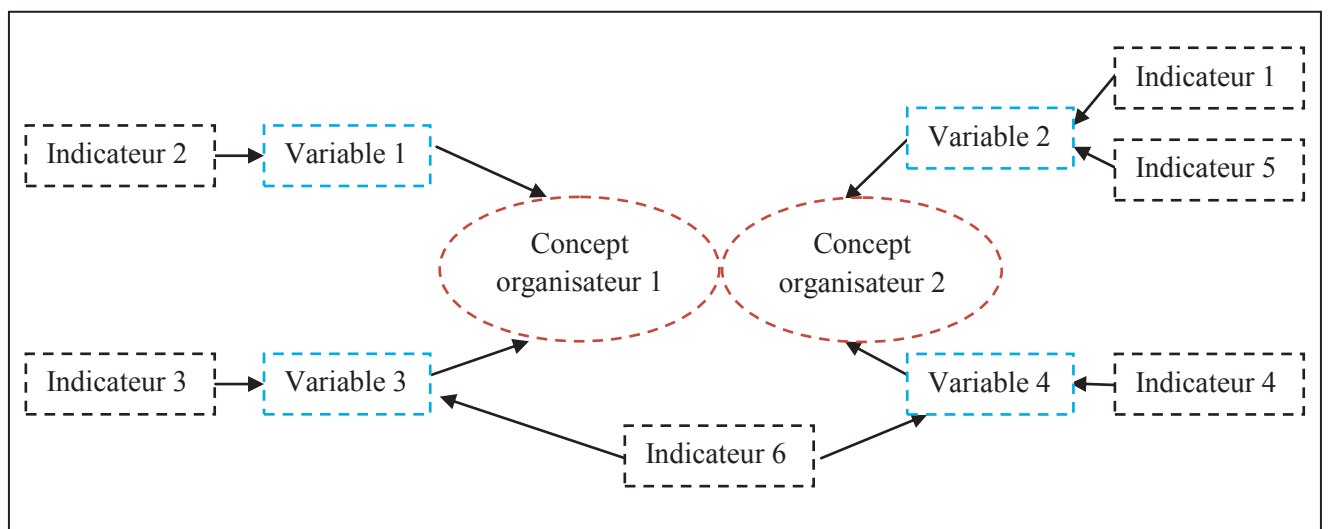
3.2.2) *Modélisation de la structure conceptuelle de la situation*

La représentation fonctionnelle et schématique de la structure conceptuelle de la situation peut être modélisée (Caens-Martins, 2005). Cette modélisation, qui témoigne de la logique de la situation, est un « construit » du chercheur à partir des actions, des prises d’informations et des raisonnements d’un ensemble de professionnels engagés dans une situation de référence du métier.

L’activité des professionnels est représentée en didactique professionnelle sous la forme d’une architecture liant concepts organisateurs, variables et indicateurs (Figure 3–1). Un concept organisateur peut être relié à plusieurs variables. Une variable peut être définie par plusieurs indicateurs et certains indicateurs peuvent informer plusieurs variables. Par la construction d’un réseau de signification, les concepts, variables et indicateurs concourent à l’interprétation de la situation dans sa singularité, à l’évaluation de la nature du problème, au choix approprié du type d’intervention, et à une anticipation des évolutions futures.

Cette modélisation permet d’identifier les éléments constitutifs des situations de référence.

Figure 3–1 : Modélisation typique d’une structure conceptuelle de la situation



3.2.3) *Identification de la structure conceptuelle de la situation*

L'identification de la structure conceptuelle d'une situation professionnelle requiert, en didactique professionnelle, une analyse de la tâche et une analyse de l'activité. L'analyse de la tâche consiste à réaliser une étude objective de la situation et des conditions nécessaires à prendre en compte pour que l'action soit efficace. L'analyse de l'activité étudie la manière dont un acteur réalise la tâche de manière efficace c'est-à-dire, la stratégie utilisée (analyse subjective) (Leplat, 2000).

L'identification de la structure conceptuelle de la situation en didactique professionnelle repose donc sur trois temps (Pastré et al., 2006) :

- Une analyse à priori de la tâche prescrite : l'objectif de cette analyse est de fournir une description de la tâche prescrite, un ensemble de règles d'action exprimant ce qu'il faut faire en fonction de la situation et, une description de l'ensemble des relations de causalité entre les paramètres d'action et le résultat ;
- Une analyse de l'activité : l'objectif de cette analyse est d'identifier les éléments significatifs de la situation pour l'acteur engagé dans cette situation ;
- Une analyse de la tâche *a posteriori* : l'objectif de cette analyse est de mobiliser l'analyse *a priori* de la tâche prescrite et l'analyse de l'activité pour identifier les concepts organisateurs de cette activité.

Cette articulation entre analyse de la tâche prescrite et analyse de l'activité met en exergue l'importance de considérer le couple situation-activité en analyse du travail. Comme l'écrit Pastré (2002) à partir de son expérience de l'analyse du travail avec des opérateurs en plasturgie, *« on ne peut pas comprendre l'activité des opérateurs si on n'a pas une connaissance minimale de la situation et de ses caractéristiques. Mais les éléments de la situation qui seront utilisés pour la construction des concepts pragmatiques ne peuvent être identifiés que par l'analyse de l'activité. C'est cette analyse de l'activité qui amène, par rétroaction, à distinguer les éléments de la situation qui font sens pour le sujet. Il y a ainsi une analyse de la situation avant l'analyse de l'activité : elle consiste à mettre à plat les différents éléments qui caractérisent la situation. Et il y a une analyse de la situation après l'analyse de l'activité : c'est seulement celle-là qui permet d'identifier les organisateurs de l'action »* (Pastré, 2002, p.14).

Dans la partie suivante et avant de nous engager dans l'analyse proprement dite de l'activité des chirurgiens-dentistes en implantologie (chapitre 4), nous présentons les travaux qui, mobilisant l'analyse de l'activité en didactique professionnelle, ont formalisé des structures conceptuelles de situations supports à la conception ou à l'évolution de dispositifs de formation intégrant des nouvelles technologies.

4) Structure conceptuelle de la situation : une revue de littérature

Conformément à la classification de Pastré et al. (2006), nous avons distingué deux types d'études : celles portant sur des systèmes non-vivants et celles portant sur des systèmes vivants.

Le but de cette partie est de présenter des études significatives portant sur l'analyse de l'activité en didactique professionnelle et qui ont pour objectif soit de concevoir des dispositifs de formation intégrant la simulation sur la base d'une analyse préalable de l'activité des acteurs, soit d'analyser l'activité d'apprenant dans une situation de simulation. Par conséquent, nous décrirons leurs principaux résultats ainsi que la manière dont elles ont caractérisé les différentes structures conceptuelles identifiées en situation. Le passage de la structure conceptuelle de la situation à la conception d'un EVAH sera présenté dans le chapitre 5.

4.1) Etudes sur les systèmes non-vivants

Les études sur les systèmes non-vivants peuvent être classées en deux catégories : celles qui portent sur la conduite de systèmes « simples » comme la conduite de machine et celles qui portent sur la conduite de systèmes « complexes » comme la conduite de centrale nucléaire.

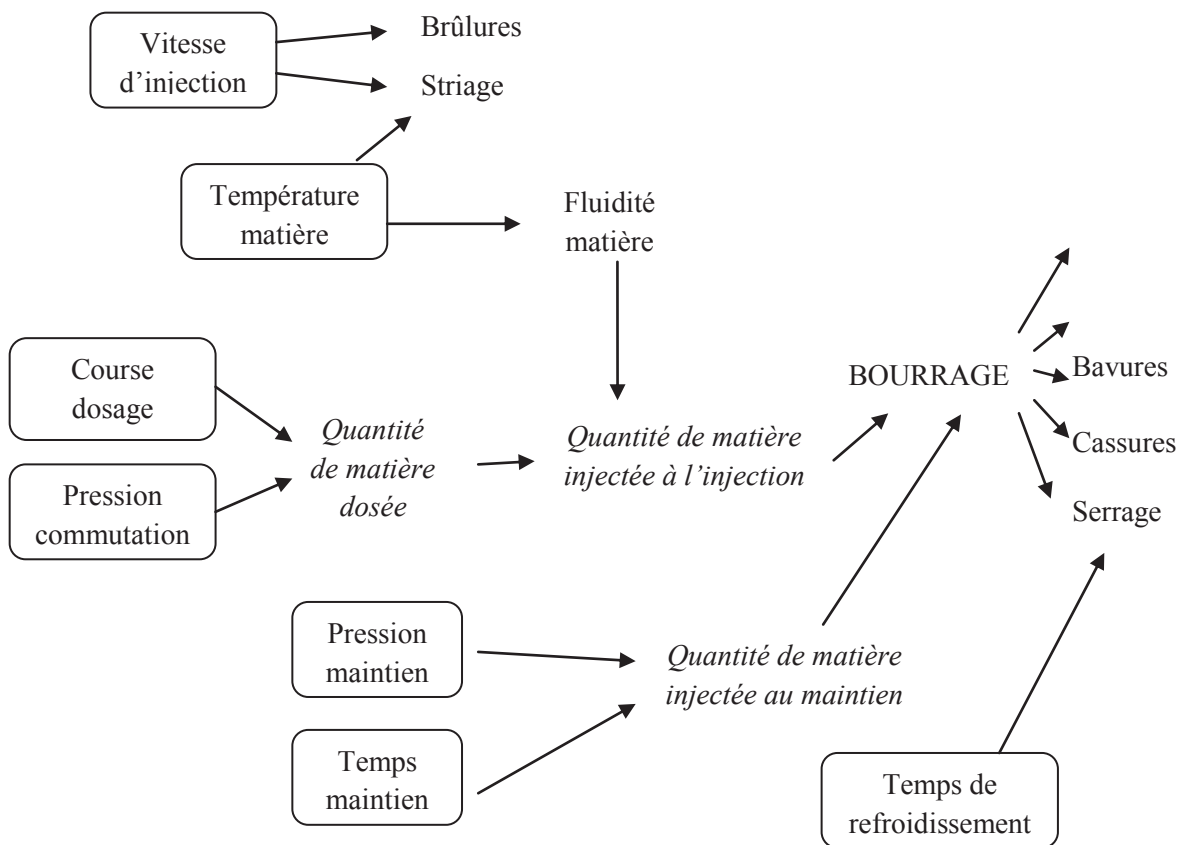
4.1.1) Les études sur les systèmes « simples »

Ces études se caractérisent le plus souvent par un apprentissage en contact direct avec la pratique amenant l'opérateur à construire « en situation » les concepts organisateurs de la situation professionnelle de référence. Les stratégies des opérateurs peuvent cependant varier d'un type de machine à un autre.

4.1.1.1) Étude de la conduite de presse à injecter

La Figure 3-2 présente la structure conceptuelle de la situation dégagée par Pastré (1992) à partir de son étude de l'activité d'ouvriers spécialisés dans la conduite de presses à injecter en plasturgie.

Figure 3-2 : Structure conceptuelle de la situation de conduite de presses à injecter



La tâche étudiée par Pastré (1992) consiste à injecter dans un moule une matière plastique à l'état liquide de manière à obtenir, après refroidissement, une pièce plastique solide. L'injection est régulée par une vis métallique s'ouvrant ou se fermant à la demande de l'opérateur. La quantité de matière injectée dans le moule est déterminante pour le résultat final. Trop peu de matière plastique conduit à la réalisation d'une pièce incomplète. Trop de matière conduit à une surcharge du travail de finition par élimination des excédents de matière plastique. La compétence de l'opérateur consiste donc à injecter la quantité de matière plastique juste nécessaire au remplissage du moule en agissant sur le processus d'ouverture/fermeture régulé par la vis d'injection.

Cependant, l'état de la vis d'injection définit deux types de régimes de fonctionnement : un régime normal lorsque la vis est en bon état et un régime compensé lorsqu'elle présente des signes d'usures après de nombreuses successions d'injections. L'opérateur doit identifier le régime de fonctionnement de sa machine et s'y adapter pour obtenir un résultat satisfaisant.

L'analyse de l'activité a montré que les opérateurs fonctionnaient en suivant différentes stratégies, que ces stratégies dépendaient du niveau de conceptualisation de la situation et que cette conceptualisation reposait sur la capacité à identifier le régime de fonctionnement de la machine (normal ou compensé). De plus, Pastré (1992) a montré que

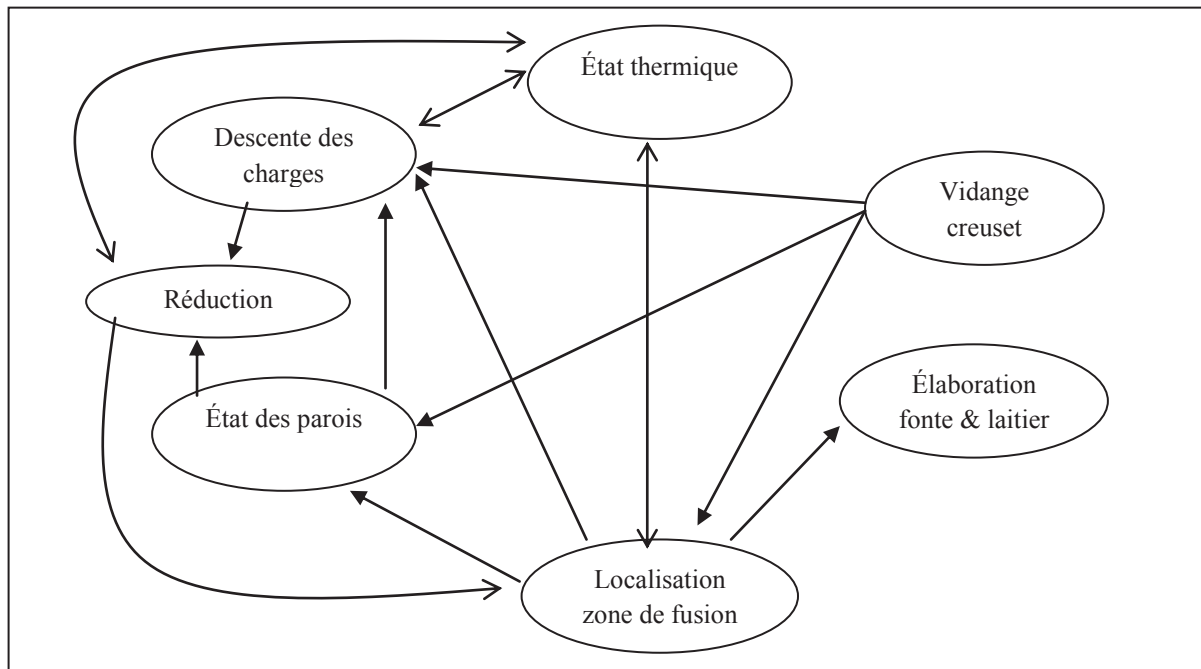
cette capacité à conceptualiser dans l'action est permise par l'élaboration d'un concept pragmatique nommé « bourrage ».

Le concept de bourrage est défini comme l'état d'équilibre ou de déséquilibre entre deux pressions : celle exercée par la machine sur la matière à injecter et celle exercée par la matière injectée. Pastré (1992) commente la structure conceptuelle de la situation en indiquant que le bourrage n'est pas directement observable et que sa valeur est référée aux mouvements de la vis d'injection à un moment précis du cycle de fabrication. L'opérateur expert réalise d'abord un diagnostic du régime de fonctionnement de sa machine à travers les mouvements de la vis d'injection. En fonction de ce diagnostic, il mobilise des règles d'actions pour adapter le temps d'injection de la matière dans le moule. Un opérateur qui n'a pas conceptualisé ce phénomène de bourrage n'est pas en mesure de réaliser ce diagnostic et peine à corriger les nombreux défauts obtenus sur les pièces en plastique. Pour Pastré (1992) ce résultat de l'analyse de l'activité *« revient à dire que c'est le concept pragmatique de bourrage qui est l'élément central dans l'organisation de l'action efficace. »* (Pastré, 2002, p.12).

4.1.1.2) Étude de la conduite de haut fourneau

La Figure 3–3 présente la structure conceptuelle de la situation dégagée par Samurçay et Pastré (1995) à partir de leur étude de l'activité d'ouvriers spécialisés dans la conduite de haut fourneau (HF).

Figure 3–3 : Structure conceptuelle de la situation de conduite de HF



La tâche étudiée par Samurçay et Pastré (1995) consiste à transformer un mélange de minerais et de coke (produits solides) en fonte (produit liquide), par une réaction chimique. Cette réaction lente est peu contrôlable par l'opérateur. Dans un souci de rentabilité, l'objectif est de maintenir une production de fonte continue et de qualité.

Le problème est que l'état de fonctionnement du haut fourneau a tendance à se dérégler, ce qui entraîne une production irrégulière de fonte. La compétence des ouvriers spécialisés consiste donc à diagnostiquer l'état de fonctionnement du haut fourneau et à appliquer les modifications nécessaires pour le maintenir dans un état de production continu. La difficulté de cette activité réside dans le fait que 1) il existe une centaine de variables pouvant modifier l'état de fonctionnement du haut fourneau ; 2) les relations entre ces variables sont complexes ; 3) le délai entre une modification du fonctionnement et la production de fonte est de plusieurs heures.

L'analyse de l'activité a montré qu'en situation réelle, afin d'établir un diagnostic de l'état d'équilibre du système, l'ouvrier spécialisé s'appuie sur sept concepts pragmatiques (état thermique, descente des charges, réduction, état des parois, localisation de la zone de fusion, élaboration de la fonte et du laitier, vidange creuset). Ces concepts pragmatiques sont construits comme des invariants relationnels permettant de mener des raisonnements pertinents et efficaces (Hoc, 1991). L'ouvrier établit ainsi des relations sensées entre les variables de la situation en fonction des dimensions essentielles de la fabrication.

Explicitons par exemple le concept pragmatique « d'état thermique ». Pour l'ouvrier novice, le concept pragmatique « d'état thermique » va se confondre avec la variable « température de fonte ». Son évaluation du système est donc basée uniquement sur les valeurs prises sur cette variable (trop chaud / pas assez chaud). Alors que l'ouvrier expert va être capable d'y associer d'autres variables thermiques (qu'il devra calculer car elles ne sont pas directement visibles) ainsi que des indicateurs chimiques. De ce fait, un expert sera par exemple capable de diagnostiquer que la température du haut fourneau est insuffisamment chaude alors même que la température de la fonte est élevée.

Finalement, dans le réseau complexe et enchevêtré des relations entre variables, les sujets mettaient de l'ordre en distinguant sept nœuds principaux de relations ou concepts pragmatiques correspondant aux dimensions essentielles de la production. Cette centration sur les éléments significatifs de la situation rendait lisible et utilisable pour l'action le réseau des enchaînements de causalité. De plus, Samurçay et Pastré (1995) ont noté deux choses sur l'utilisation de ces concepts pragmatiques : 1) leur utilisation est liée au niveau d'expertise de l'opérateur : plus l'opérateur est expert, plus l'utilisation des invariants est importante dans le raisonnement et, 2) plus il existe un répertoire d'action important pour un concept, plus celui-ci est utilisé. Ainsi, un opérateur ne peut pas conduire un haut fourneau par simple rétroaction (comme c'était le cas pour la presse à injecter) puisqu'il ne peut pas réguler les variables d'entrée à partir des variables de sortie (résultat).

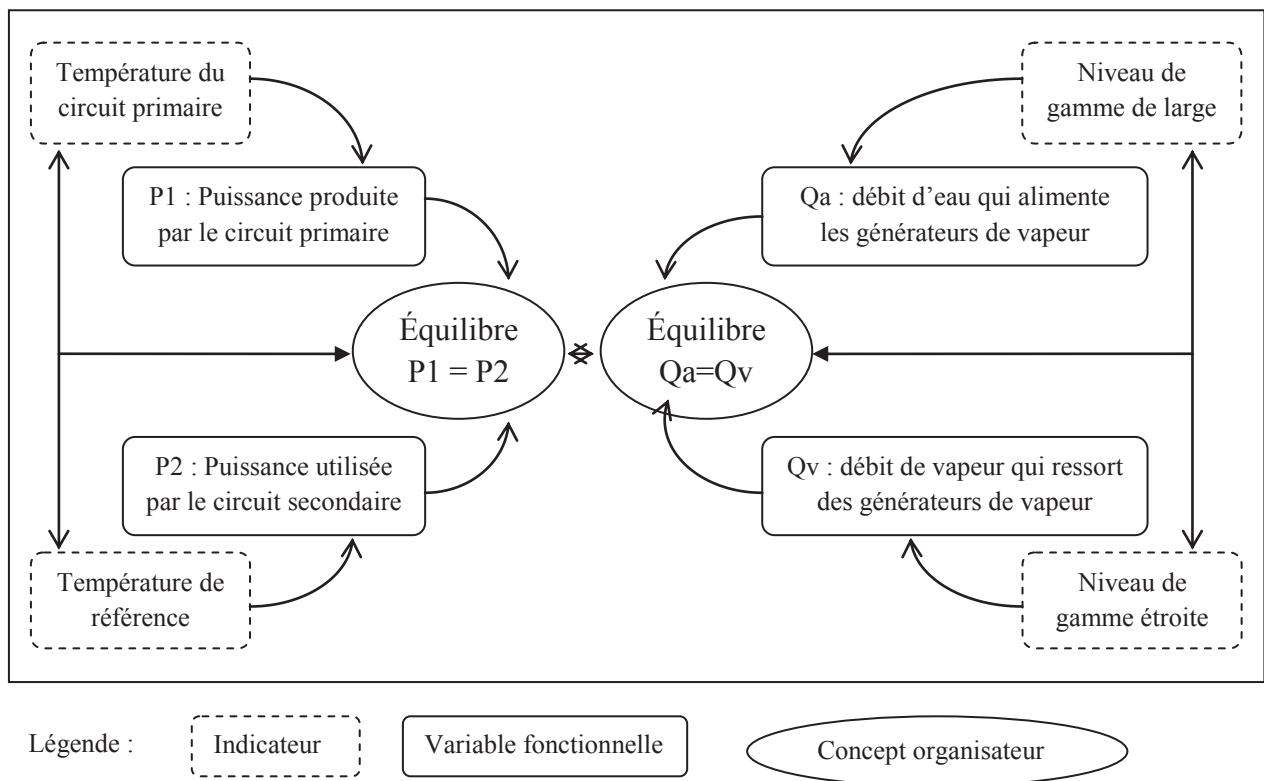
Les deux études présentées ci-dessus révèlent que, lorsque l'apprentissage se fait au contact direct de la pratique (apprentissage sur le tas), les opérateurs construisent des concepts pragmatiques dans l'action et développent des stratégies de régulation lorsque des données de

sorties (connaissance du résultat) sont disponibles (cas des presses à injecter) et, des stratégies d'anticipation et de diagnostic lorsque la connaissance du résultat est différée dans le temps (cas des conduites de haut-fourneau).

4.1.2) Études sur les systèmes dynamiques « complexes » : la conduite d'une centrale nucléaire

La Figure 3–4 illustre une représentation schématique de la structure conceptuelle de la situation de conduite de centrale nucléaire décrite dans les travaux de Pastré (1999a, 2005b). Ces études sont significatives des études en didactique professionnelle portant sur les systèmes dynamiques complexes.

Figure 3–4 : Représentation schématique de la structure conceptuelle de la situation de conduite de centrale nucléaire



La tâche étudiée par Pastré consiste à contrôler l'activité d'un réacteur nucléaire. Une centrale nucléaire est constituée de deux circuits : un circuit primaire qui produit de la chaleur et la diffuse ; un circuit secondaire qui à partir de cette chaleur fait tourner une turbine et un alternateur pour produire de l'énergie. Entre le circuit primaire et secondaire, l'échange thermique se fait par les générateurs de vapeur.

Le dilemme des ingénieurs en charge de la centrale nucléaire est de maintenir stable les niveaux d'eau dans les générateurs de vapeur alors que ces niveaux évoluent de façon très dynamique. Pour ce faire, les ingénieurs travaillent en binôme et agissent à la fois sur le circuit primaire et à la fois sur le circuit secondaire.

L'analyse de l'activité²⁸ montre que pour y arriver le binôme doit maintenir deux équilibres simultanément : un premier équilibre entre la puissance produite par le circuit primaire et la puissance consommée par le circuit secondaire ($P1 = P2$) ; un deuxième équilibre entre le débit d'eau qui alimente les générateurs de vapeur et le débit de vapeur qui en ressort ($Qa = Qv$). Ces deux équilibres correspondent aux deux concepts organisateurs de l'activité d'un ingénieur lors d'une conduite de centrale nucléaire.

Pour maintenir « l'équilibre $P1 = P2$ », l'opérateur doit pouvoir évaluer les variables $P1$ (puissance produite par le circuit primaire) et $P2$ (puissance utilisée par le circuit secondaire). Or ces variables ne sont pas directement observables. Par conséquent, l'opérateur va être attentif à deux indicateurs : « la température moyenne du circuit primaire » qui varie en proportion de la puissance produite par le circuit primaire et le débit de vapeur utilisée par le circuit secondaire qui est traduit en « température de référence » du circuit secondaire pour pouvoir la comparer à la température moyenne du circuit primaire. C'est donc grâce à la comparaison de ces deux indicateurs que l'ingénieur va être capable de maintenir « l'équilibre $P1 = P2$ ».

Pour maintenir l'équilibre entre le débit d'eau qui alimente les générateurs de vapeur (Qa) et le débit de vapeur qui sort (Qv), l'ingénieur doit connaître la quantité d'eau et de vapeur dans les générateurs de vapeur. Or dans un générateur de vapeur, on peut distinguer trois zones, une partie inférieure contenant de l'eau ; une partie supérieure contenant de la vapeur ; et une partie intermédiaire contenant un mélange d'eau liquide et de bulles de vapeur. Il est donc difficile d'apprécier de façon exacte les quantités d'eau et de vapeur. Pour y arriver, l'ingénieur dispose de deux indicateurs : « le niveau de gamme large » qui correspond à la masse présente d'eau ; et « le niveau de gamme étroite » qui tient compte de la quantité de vapeur présente dans l'eau liquide. Mais ces indicateurs ne sont pas triviaux à analyser car quand on ajoute de l'eau dans le générateur de vapeur, dans la mesure où celle-ci est plus froide, elle va provoquer un tassement provisoire du « niveau de gamme étroite » par absorption d'une partie de la vapeur. Ainsi, une lecture rapide des indicateurs indiquerait qu'en ajoutant de l'eau, on fait baisser le niveau d'eau !

Finalement de ces études, nous pouvons retenir trois informations :

- Les relations entre les variables fonctionnelles sont nombreuses et complexes, de sorte que les ingénieurs ne peuvent pas maîtriser dans la totalité leur champ de travail. Ils doivent utiliser une représentation permettant de distinguer l'essentiel de l'accessoire et l'urgent du non-urgent.

²⁸ En raison des risques à provoquer un déséquilibre d'une centrale nucléaire, l'analyse de l'activité des ingénieurs n'a pu se faire en situation réelle d'exercice. L'analyse de l'activité dont rendent compte les études de Pastré porte sur des jeunes cadres et des opérateurs en formation en situations simulées.

- Les principales variables fonctionnelles ne sont pas toujours directement accessibles soit en termes d'action, soit en termes de prise d'information.
- Il faut tenir compte de la temporalité des événements afin de diagnostiquer au mieux la situation.

De plus, la différence entre l'expert et le novice ne se situe pas au niveau des connaissances du fonctionnement d'une centrale nucléaire (tous les ingénieurs connaissent les principes de fonctionnement grâce à leur formation théorique) mais sur leur capacité à faire des relations de significations entre les indicateurs, paramètres d'action et variables fonctionnelles. Cette distinction amène les experts à prendre des informations sur l'ensemble du système (et pas uniquement sur la partie dont il est en charge²⁹) ; à distinguer les phénomènes de surface très visibles mais peu représentatifs des évolutions à long terme des phénomènes plus profonds qui sont représentatifs de la dynamique d'ensemble. Ainsi, les ingénieurs ayant conceptualisé la situation mettent en place une stratégie à « boucle longue », c'est-à-dire une stratégie analytique, anticipatrice, et globale ; alors que les autres mettent en place une stratégie « à boucle courte », c'est-à-dire qu'elle est procédurale (confusion entre indicateurs et buts de l'action), rétroactive (utilisation des résultats de sorties pour modifier les entrées) et partielle (pas de diagnostic d'ensemble). La première stratégie anticipe les déséquilibres, ce qui permet de surmonter les moments critiques et de conserver la maîtrise de la centrale. La deuxième stratégie conduit à réguler la centrale en fonction des événements produits, ce qui aboutit dans les moments critiques à des arrêts d'urgence.

La comparaison entre les études sur les systèmes « simples » et les systèmes dynamiques complexes montre l'existence de similitudes (Pastré, 2002). En effet, si on réalise dans les deux cas une analyse du travail alors on peut montrer qu'il existe des concepts organisateurs de l'action. Ces concepts sont multiples et forment un réseau appelé structure conceptuelle de la situation. Cependant, il existe une différence notable entre la conduite de machine et la conduite d'une centrale nucléaire. Pour la conduite de machine, l'apprentissage s'est fait sur le tas. Par conséquent, on parle de concepts « pragmatiques » : concepts construits pour et dans l'action. Ils font partie des savoirs de métier, dont ils représentent les bonnes pratiques. Mais, ils ne sont valables que dans le cadre du domaine professionnel. Dans le cas de la conduite de centrales, la formation théorique a permis d'explicitier et de construire des connaissances. Par conséquent, le rapport entre concepts scientifiques (théoriques) et concepts pragmatiques pose un problème très différent : il faut « pragmatiser » les concepts scientifiques. Cette « pragmatisation » des concepts scientifiques impose une distinction entre concepts et indicateurs, avec la particularité que pour la conduite de centrales les indicateurs ne sont pas des observables sensoriels (percevoir un mouvement, repérer un bruit ou une odeur), mais sont déjà des variables instrumentées. Ainsi, ce sont des variables (par exemple une température) qui vont servir à évaluer d'autres variables, plus fondamentales pour le diagnostic, mais non directement accessibles (par exemple, une puissance). Il y a donc transformation d'un système de connaissances (les relations de détermination existant entre des variables) en un système de diagnostic (une ou plusieurs variables servant d'indicateurs

²⁹ Les ingénieurs sont en binôme. Un ingénieur est en charge du circuit primaire tandis que l'autre est en charge du circuit secondaire.

pour évaluer un équilibre de base du système), c'est-à-dire pragmatisation de certaines connaissances scientifiques.

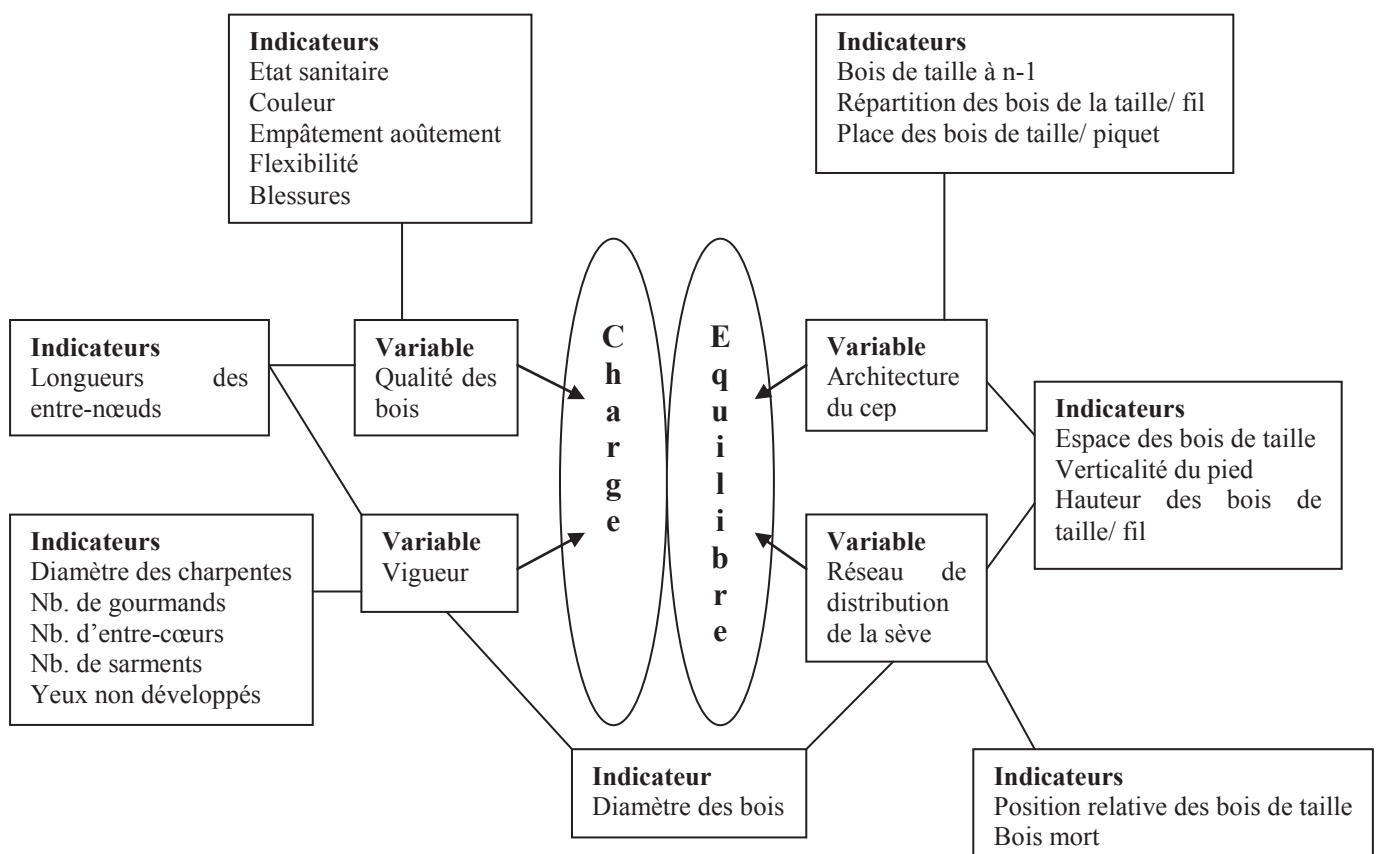
4.2) Études sur les systèmes vivants

Nous présentons deux études sur les systèmes vivants, une sur la taille de la vigne et une sur la chirurgie orthopédique.

4.2.1) Étude de la taille de la vigne

La Figure 3–5 présente la structure conceptuelle de la situation dégagée par Caens-Martin (1999, 2004) à partir de son étude de l'activité d'ouvriers tailleurs de vignes.

Figure 3–5 : Structure conceptuelle de la situation de la taille de la vigne



La tâche étudiée par (Caens-Martin, 1999) consiste à tailler un cep de vigne. La vigne est une plante pérenne qui possède des mécanismes d'autorégulation biologiques. À l'état

naturel, elle se comporte comme une liane. Elle développe des tiges sarmenteuses qui peuvent s'accrocher à des supports divers grâce à leurs vrilles. L'exploitation de la vigne nécessite donc des tailles régulières pour contrôler sa production de raisin. Cette opération est effectuée par des ouvriers tailleurs de vignes. Les nouvelles exigences économiques auxquelles sont confrontés les viticulteurs les amènent à considérer avec une grande attention la taille de la vigne. Pour ce faire, ils font appel à des professionnels compétents.

Le dilemme auquel est confronté ce professionnel tailleur consiste à gérer un compromis entre la quantité de raisin produite par le cep et le capital vie de la plante, c'est-à-dire sa pérennité. Pour cela le tailleur décide entre deux types de tailles possibles : la taille courte qui consiste à laisser deux bourgeons fructifères par bois (maintien du capital vie mais faible production) ; la taille longue qui consiste à laisser six bourgeons fructifères sur un même bois (forte production mais affectation du capital vie).

L'analyse de l'activité de taille en situation réelle a permis de montrer que l'ensemble des opérations de raisonnement du professionnel s'appuie d'une part sur une représentation du processus dynamique en cours et d'autre part sur une représentation des effets de taille sur l'évolution probable du végétal. Autrement dit, maîtriser la production de raisin, c'est chercher à contenir dans la durée les fluctuations inévitables de croissance et de développement du système vivant dans son environnement de culture. L'activité de raisonnement des tailleurs s'oriente vers du diagnostic et de l'anticipation, en fonction de l'historique de la vigne pour optimiser le compromis entre production et pérennisation du cep. Cette activité de diagnostic est extrêmement difficile à acquérir car elle doit se faire dans un contexte temporel beaucoup plus large que celui de l'intervention immédiate. Caens-Martin dégage que les informations prélevées sur la souche par les tailleurs sont essentiellement visuelles (exemple : forme du cep, nombre et diamètre des sarments, couleur des bois) et tactiles (exemples : flexibilité, qualité d'attache du sarment sur la charpente). Ces prises d'information conduisent le professionnel à un diagnostic de la situation qui lui permet d'identifier les réactions du végétal à la taille de l'année précédente, de faire une évaluation de l'état actuel de la situation et de son évolution probable en fonction des différentes options de tailles possibles. Ces indicateurs permettent de qualifier, voire de quantifier certaines variables.

Caens-Martin dégage, deux concepts organisateurs de l'activité de tailleur de vigne celui de « charge » et celui « d'équilibre ». Le concept de charge fait référence au nombre de grappes que le cep est capable de produire compte tenu de son état physiologique. Ce concept est renseigné par deux variables (qualité des bois et vigueur) qui disposent de plusieurs indicateurs. Le concept d'équilibre qui fait référence à la fois à la dimension d'occupation de l'espace (l'architecture du cep) et d'équilibre physiologique de la distribution de la sève. Ce concept est également renseigné par deux variables (architecture du cep et réseau de distribution de la sève) qui disposent également de plusieurs indicateurs. Que l'on soit en taille longue ou en taille courte, les variables construites sont les mêmes, seuls quelques indicateurs diffèrent.

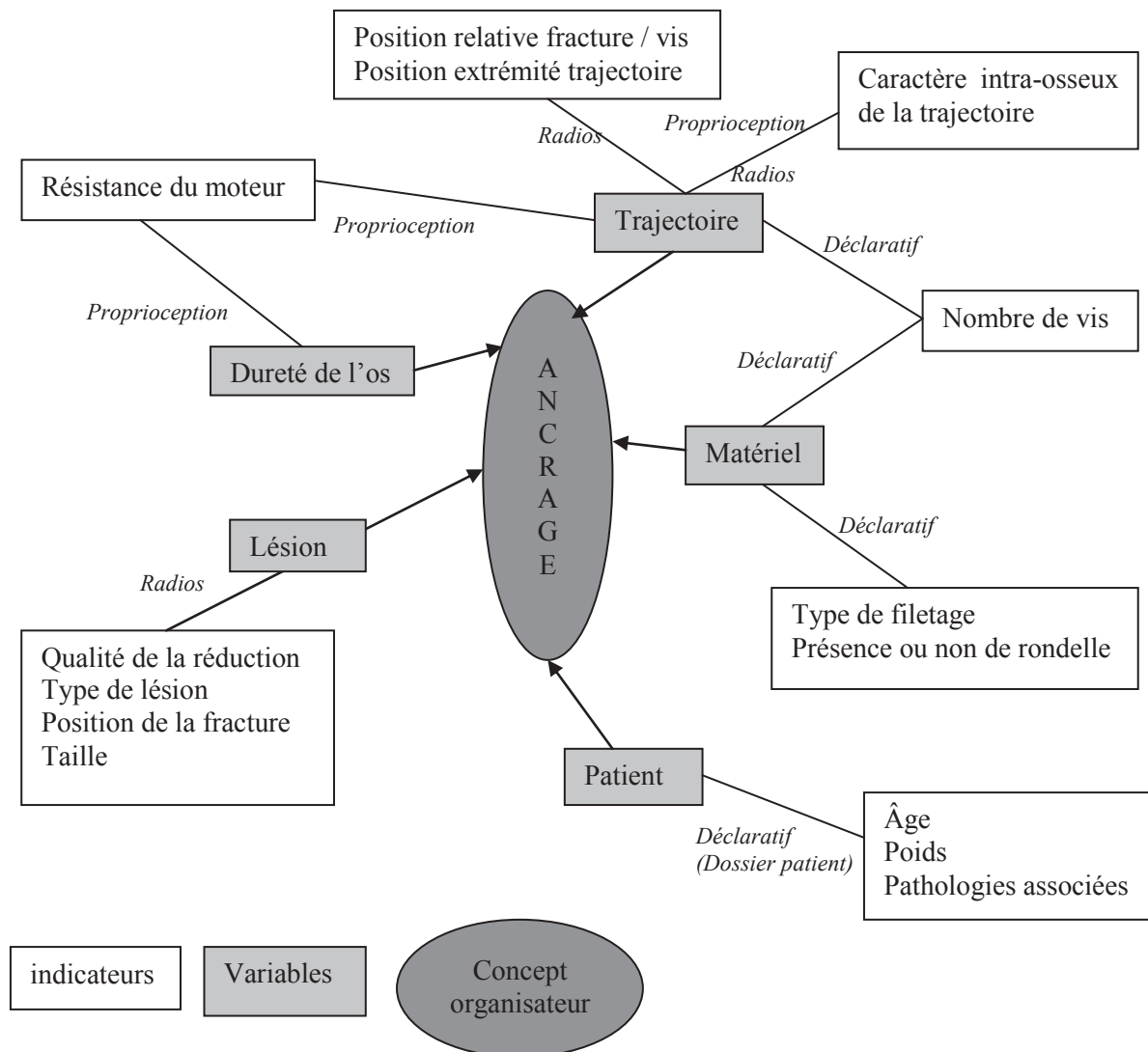
Cette organisation de la pensée pour l'action amène le professionnel à retenir les bois qui lui paraissent les plus adaptés au diagnostic de la situation. Ceux-ci ne sont donc pas obligatoirement les plus « beaux » mais ceux qui, dans la situation, répondent le mieux aux buts recherchés. De plus, comme le montre la figure 3-5, certains indicateurs permettent de renseigner plusieurs variables. Tous les indicateurs ne sont pas systématiquement utilisés mais, selon la situation, ils seront exploités jusqu'à l'analyse correcte de la situation. L'expertise du tailleur s'exprime particulièrement dans les situations d'entre-deux où sans avoir « répondu » exactement à la taille de l'année précédente le cep ne présente pas pour autant une situation dégradée. Cette situation est rencontrée très fréquemment par les tailleurs.

Finalement, bien que le travail du tailleur est de gérer le compromis entre les deux concepts organisateurs en s'appuyant sur les variables et les indicateurs identifiés ; il faut noter que la variabilité des situations de taille amène le professionnel à mobiliser systématiquement ces deux concepts dans des proportions différentes. Ceci amène certains novices à privilégier l'un des deux concepts, généralement celui de charge, et à délaisser (en partie) le concept d'équilibre ; chose que l'expert ne fera pas.

4.2.2) Étude de la chirurgie orthopédique

La Figure 3–6 présente la structure conceptuelle de la situation dégagée par Vadcard (Vadcard, 2005 ; Vadcard et Luengo, 2005 ; Mufti-Alchawafa, Luengo et Vadcard, 2007 ; Vadcard, Dubois, Tonetti et Luengo, 2009) à partir de son étude de l'activité de médecins en chirurgie orthopédique.

Figure 3–6 : Structure conceptuelle de la situation de chirurgie orthopédique



La tâche étudiée par Vadcard se déroule dans le cadre de la chirurgie percutanée, c'est-à-dire dans le cadre de chirurgie qui n'implique pas d'autre incision que celles nécessaires au passage des instruments. Plus précisément, la tâche consiste à *placer un implant (clou, vis) pour maintenir un os fracturé en position de reconstruction. Une broche qui servira de guide à la vis est insérée à travers la peau, puis à travers l'os. Le geste est contrôlé par la prise de radio tout au long de l'intervention* » (Vadcard et al., 2009, p.1). Les interventions observées sont des poses de vis ilio-sacrées entre os iliaque et sacrum pour les lésions du bassin.

Le dilemme pour les chirurgiens est de réussir à placer correctement la broche en l'absence de contrôle visuel direct de l'action et sans irradier outre mesure le patient. Car le seul moyen pour le chirurgien de contrôler l'avancée de sa broche dans le patient est la prise de radiographies. Pour y arriver, le chirurgien doit réaliser une triangulation entre main-œil-

radiographie afin de réaliser une reconstruction mentale de la position de la broche dans le volume du bassin à partir des différentes radiographies réalisées³⁰.

L'analyse de l'activité a montré que les chirurgiens mobilisaient des indicateurs et des variables de la situation afin de renseigner le concept pragmatique « d'ancrage ». Ce concept peut être défini comme la capacité de l'implant à assurer sa fonction de maintien de l'os en position de reconstruction. De plus, Vadcard précise que certains des indicateurs sont instanciés avant que la chirurgie débute (par exemple type de lésion, âge et sexe du patient, matériel disponible) et d'autres pendant la chirurgie. Parmi ces derniers, certains étaient stables (c'est-à-dire qu'ils ne prenaient qu'une valeur pour la totalité de l'intervention, comme par exemple la quantité d'os) et d'autres étaient instables (c'est-à-dire que leurs valeurs évoluaient au cours de la chirurgie comme par exemple les caractéristiques de la trajectoire de la broche, la quantité d'irradiation et la durée de l'intervention).

Enfin, cette étude va plus loin et propose d'associer à la structure conceptuelle de la situation les connaissances qui sont mises en œuvre par le chirurgien pour agir efficacement en situation. En effet, Vadcard va associer à chaque connaissance identifiée un domaine de validité : car en fonction du type d'intervention, les caractéristiques d'une variable peuvent évoluer. Ceci permet d'identifier les connaissances sous-jacentes aux actions entreprises par les chirurgiens au cours de l'activité et de décrire les caractéristiques de son expérience.

Les deux études présentées ci-dessus sur le système vivant se différencient des études portant sur les systèmes non-vivants à trois niveaux. Le premier concerne le fait qu'un système vivant est en interaction avec son milieu. Cela nécessite de la part des professionnels de construire (bien souvent sans instruments de mesure directs) un diagnostic de la situation : apprécier l'état du système dans sa dynamique d'évolution, anticiper des effets probables de son action sur le sens de l'évolution du système vivant, « jouer » avec des événements aléatoires, climatiques par exemple. La seconde idée souligne le fait que l'intervention n'est pas univoque et que plusieurs modalités d'interventions sont possibles. Le rapport à la prescription, même si cette dernière existe, n'est pas la seule référence. De ce point de vue, la compréhension de l'activité professionnelle nécessite une forte investigation d'analyse du côté des professionnels eux-mêmes pour rendre compte des stratégies qu'ils mobilisent et des enjeux qu'ils énoncent en fonction des actions qu'ils entreprennent. La troisième idée concerne le fait que pour chaque système vivant, il existe une infinité de situations. Or les situations qui nécessiteraient le plus d'être présentées aux apprenants sont souvent rares. Ce qui implique que des professionnels peuvent avoir terminé et validé leur formation et se retrouver dans la réalité du travail face à des situations qu'ils n'ont jamais rencontrées auparavant.

³⁰ Pour permettre au chirurgien de réaliser une reconstruction mentale du patient en 3D, différentes incidences radiographiques sont utilisées au cours de l'intervention. Le terme « d'incidence » signifie que les radios sont prises de différents points de vues : inlet, face, outlet, profil.

5) Conclusion du chapitre

Parmi l'ensemble des approches théoriques permettant d'analyser l'activité au travail, nous avons choisi de mobiliser le cadre théorique de la didactique professionnelle car celui-ci correspond aux objectifs de notre étude : concevoir un EVAH se basant sur une analyse de l'activité dans le but de former des adultes à des compétences grâce à des situations de travail.

Le cadre théorique de la didactique professionnelle, formalisé par Pastré (1999b), s'est construit à partir de deux apports théoriques : la psychologie du travail et la psychologie du développement. De la psychologie du travail, la didactique professionnelle retient qu'être compétent, ce n'est pas appliquer des connaissances mais sélectionner certaines dimensions de la situation de travail pour en faire des éléments organisateurs de son activité. De la psychologie du développement, la didactique professionnelle retient que l'activité humaine est organisée autour de schèmes, constitués en partie d'invariants opératoires permettant d'identifier, d'interpréter, et de traiter l'information pertinente dans une classe de situations.

En tenant compte de ces apports, la didactique professionnelle va relier analyse du travail et formation, en proposant d'identifier les compétences à transmettre lors d'une formation. Pour cela, l'analyse du travail portera sur la tâche prescrite, sur l'activité effective et aura pour but d'identifier ce qui permet à un sujet de sélectionner, d'interpréter et de traiter les informations pertinentes dans une classe de situations, ce qui correspond aux concepts organisateurs de l'activité.

Pour identifier ces concepts organisateurs, la didactique professionnelle va définir la structure conceptuelle de la situation du métier à former. Celle-ci peut se définir comme l'ensemble des concepts pragmatiques ou théoriques qui permettent de définir une logique de la situation et expliquent l'efficacité de l'action (Pastré et al., 2006). Elle représente le noyau conceptuel qu'il faut prendre en compte pour que l'action soit pertinente et efficace (Samurçay et Pastré, 2004) ainsi que les concepts servant à établir un diagnostic de la situation.

Plusieurs études ont mobilisé ce cadre théorique pour formaliser des structures conceptuelles de la situation support à la conception ou à l'évolution de dispositifs de formation intégrant des nouvelles technologies. Certaines de ces études portaient sur des systèmes non-vivants (conducteur de presse à injecter, de haut fourneau, de centrale nucléaire) et d'autres sur des systèmes vivants (tailleur de vigne, chirurgien orthopédique). Toutes ont montré que l'activité des professionnels s'organisait autour de concepts pragmatiques soit appris au contact direct de la pratique (apprentissage sur le tas) soit appris grâce à un processus de « pragmatisation » des concepts scientifiques acquis en formation théorique. De plus, ces études ont montré qu'en fonction des niveaux de conceptualisation et des besoins de la situation, les professionnels adoptaient différentes stratégies (régulation / anticipation). Enfin, ces études ont également mis en avant des différences entre la conduite de systèmes non-vivants et celle de systèmes vivants (évolution dynamique du système,

absence de solution univoque car souvent plusieurs possibles toutes aussi valides, infinité de situations).

L'objectif du chapitre suivant sera donc de réinvestir ce cadre théorique afin d'analyser l'activité des chirurgiens-dentistes en implantologie et d'identifier de la structure conceptuelle de la situation. Cette étude servira i) de base à la conception de notre EVHA (chapitre 5), ii) à compléter la littérature dans le domaine médical, car à notre connaissance, seules les études de Vadcard (2005, 2007, 2009) le mobilisent, iii) à confronter nos résultats avec les études présentées ci-dessus.

4e chapitre : Étude 1 : analyse de l'activité de chirurgiens-dentistes en implantologie

1) Introduction

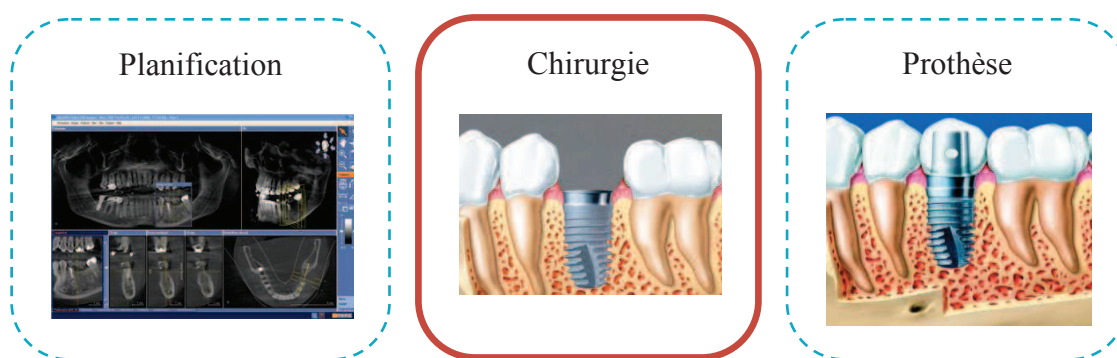
Dans ce chapitre 4, nous mobilisons l'approche en analyse de l'activité développée en didactique professionnelle pour dégager la structure conceptuelle de la situation d'implantologie dentaire. Ce chapitre est donc organisé en suivant les trois temps de l'analyse de l'activité en didactique professionnelle : analyse *a priori* de la tâche prescrite, analyse de l'activité et identification de la structure conceptuelle de la situation.

La tâche d'implantologie présente une grande variabilité des conditions de son exécution. En effet, les structures anatomiques des patients, leur historique de soins, leurs attentes vis-à-vis de l'implantologie induisent pour les chirurgiens-dentistes que chaque intervention est unique. Pour autant, derrière cette forte variabilité, une analyse de l'activité repose sur l'hypothèse que des éléments communs structurent les interventions des chirurgiens-dentistes. C'est ce que nous allons nous employer à démontrer dans ce chapitre.

2) Analyse *a priori* de la tâche prescrite

L'implantologie est une technique dentaire qui consiste à fixer dans l'os une racine artificielle en titane supportant une dent prothétique. Elle comporte trois phases principales (Figure 4-1) : une phase de planification de la chirurgie qui consiste à définir les caractéristiques et le positionnement du ou des implants à poser, une phase de chirurgie qui consiste à poser le ou les implants dans la bouche du patient en respectant les choix réalisés durant la phase de planification et, une phase dite prothétique qui consiste à réaliser et à poser la prothèse sur la partie de l'implant qui émerge de la mâchoire du patient. Notre EVAH ayant pour objectif d'apprendre à des dentistes experts à réaliser une chirurgie implantaire efficace, nous développerons uniquement dans cette partie la phase chirurgicale.

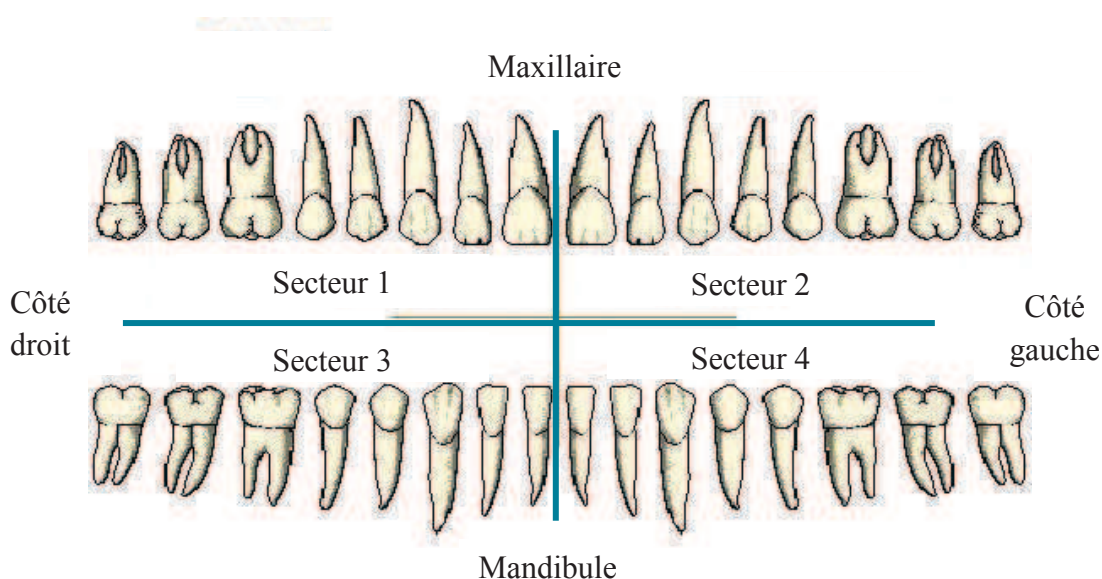
Figure 4-1 : Illustration des trois phases de l'implantologie



2.1) L'intervention chirurgicale

L'intervention chirurgicale se réalise dans un secteur déterminé. Les implants dentaires sont en effet localisés dans la bouche du patient en fonction de secteurs. La Figure 4-2 présente ces différents secteurs.

Figure 4-2 : Illustration de la signification des secteurs sur les mâchoires



Lorsque le protocole implantaire intégrant le choix de l'implant a été défini et le positionnement en bouche de l'implant déterminé (phase de planification), dentiste et patient s'engagent dans la phase de chirurgie. Pour décrire cette tâche nous avons mobilisé trois sources principales d'informations :

- des ouvrages spécialisés de référence en implantologie dentaire (Renouard et Rangert, 2005 ; Davarpanah et Szmukler-Moncler, 2007) ;

- une observation de cours théoriques et de travaux pratiques organisés dans le cadre de la première année du diplôme universitaire d'implantologie de Brest ;
- les protocoles opératoires définis par les fabricants d'implants dentaires ;

L'intervention chirurgicale en implantologie dentaire peut être décrite en trois phases : la préparation du forage, le forage et la mise en place de l'implant.

Nous présentons successivement ces trois phases.

2.1.1) Préparation du forage

Lorsque la salle d'intervention et le patient ont été préparés pour la chirurgie implantaire, le dentiste débute l'intervention par une incision de la gencive. Ce temps de l'intervention est appelé le temps muqueux. Le but pour le praticien est d'accéder au site osseux du forage. Il faut noter qu'il existe différents types d'incision que le dentiste doit maîtriser et pouvoir adapter en fonction des besoins de sa chirurgie. Une fois l'incision réalisée, s'il reste des tissus inflammatoires collés sur la surface de l'os, le dentiste devra les éliminer pour obtenir un site osseux totalement dégagé. La Figure 4–3 illustre cette phase d'incision de la gencive conduisant à l'accès au site osseux de forage.

Figure 4–3 : Illustration de la phase d'incision



2.1.2) Le forage

Pour réaliser cette étape, le chirurgien-dentiste dispose de trois éléments matériels indispensables : une trousse implantaire³¹, un contre-angle et un moteur (Figure 4–4). Chaque fabricant d'implant préconise une séquence de forage spécifique. Par conséquent, il existe une trousse implantaire par fabricant, et l'utilisation de chaque trousse implantaire va être

³¹ Une trousse implantaire est l'ensemble du matériel nécessaire pour réaliser le site implantaire et la pose de l'implant.

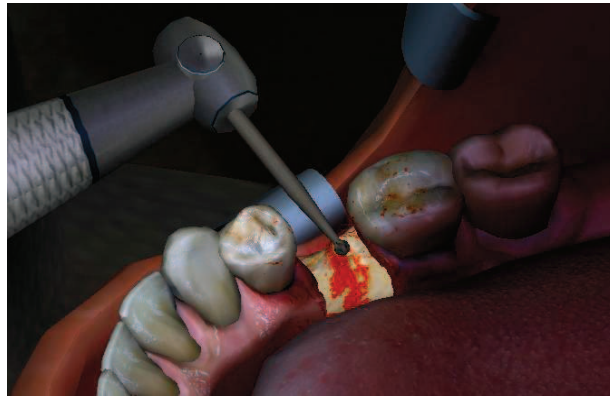
différente selon le modèle et les caractéristiques de l'implant à poser. De plus, pour utiliser un foret, il faut l'insérer dans le contre-angle du dentiste. Ce contre-angle est relié à un moteur qui va faire tourner le foret à une certaine vitesse. La vitesse de rotation est déterminée par le fabricant et est spécifique à chaque foret. Par conséquent, la vitesse de rotation peut être différente d'un fabricant à l'autre mais aussi d'un foret à l'autre pour une même marque d'implant. L'utilisation et les réglages à effectuer sur le moteur varient également selon la marque du moteur. Cependant, tous les moteurs s'activent grâce à une pédale. La pédale peut avoir plusieurs boutons poussoirs (activation de la rotation, passage au programme suivant, activation de la rotation dans le sens contraire), fonctionner selon un mode tout ou rien (soit le foret est arrêté, soit il tourne à la vitesse déterminée) ou permettre de modifier la vitesse de rotation en appuyant plus ou moins fort sur la pédale.

Figure 4-4 : Illustration du matériel spécifique à l'implantologie

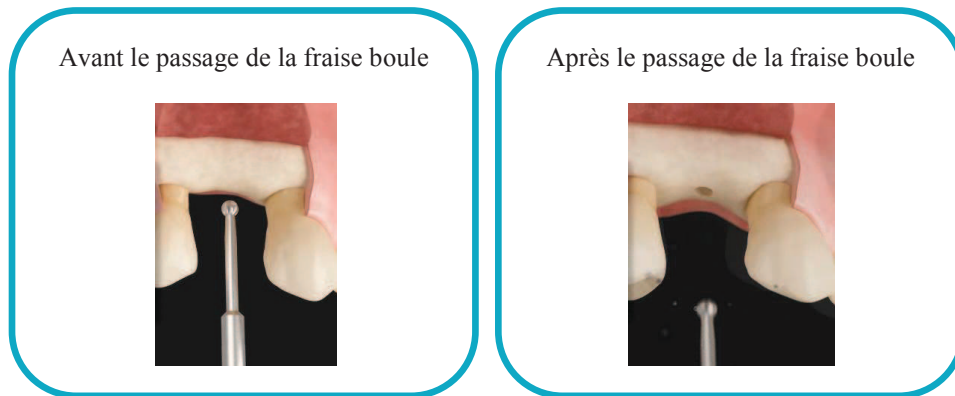


L'objectif de la phase de forage pour le praticien est de réaliser le puits de forage dans l'os qui accueillera l'implant retenu. Les caractéristiques du puits de forage devront correspondre précisément aux caractéristiques de l'implant retenu durant la phase de planification en termes de localisation, d'angulation et de profondeur. Cette phase est désignée sous le terme de « temps osseux » en contraste avec le temps muqueux introduit précédemment. Dans le but de ne pas endommager l'os, le dentiste devra passer une succession de forets ayant un diamètre de plus en plus gros pour élargir progressivement le volume du puits de forage. Ce passage d'une succession de foret est appelé « séquence de forage » et se réalise en sept étapes : l'aplanissement de la crête osseuse, le pointage de la crête osseuse, le passage du foret pilote, le passage du ou des foret(s) intermédiaire(s), le passage du foret final, la création de l'évasement et enfin, le taraudage. Certaines de ces étapes sont facultatives et dépendent de la situation, alors que d'autres sont indispensables. Nous indiquerons au cours du développement le caractère facultatif ou obligatoire de ces différentes étapes.

La première étape consiste en l'aplanissement de la crête osseuse. Cette étape est parfois nécessaire lorsque la crête osseuse présente par exemple une forme biseautée ou des irrégularités. Elle est réalisée par le praticien en plaçant la fraise à os perpendiculaire à la surface osseuse comme illustré dans la Figure 4-5.

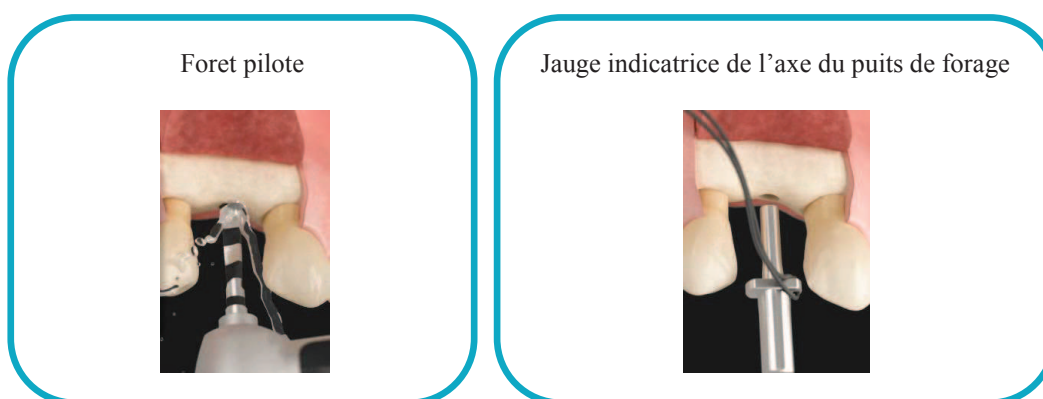
Figure 4-5 : Illustration d'un aplanissement de crête osseuse

Le pointage de la crête osseuse consiste à marquer sur l'os l'emplacement du forage et à préparer le passage du foret pilote. La localisation de l'implant se traduit de manière concrète par une marque sur la structure osseuse. Cette marque sert de guide à l'engagement du foret pilote dans l'os et évite que celui-ci ne dérape sur la crête osseuse. Pour réaliser le marquage, le chirurgien-dentiste utilise un foret pointeur ou une fraise boule (Figure 4-6) c'est-à-dire un foret comportant à son extrémité une boule dentelée de faible diamètre qui va forer la partie supérieure de l'os, appelée corticale osseuse, sur une profondeur de deux millimètres.

Figure 4-6 : Illustration du pointage de la crête osseuse grâce à la fraise boule

Le passage du foret pilote constitue l'étape suivante. L'objectif pour le praticien est d'obtenir la profondeur souhaitée du puits de forage ainsi que son orientation axiale. Cette étape est réalisée en trois temps (Figure 4-7). Dans un premier temps, le chirurgien-dentiste fore jusqu'à environ la moitié de la profondeur souhaitée pour le puits de forage. Dans un second temps, il évalue l'orientation axiale en insérant une jauge indicatrice de l'axe du puits de forage. Dans un troisième temps et en fonction de cette évaluation, il corrige ou non son axe en perçant l'os avec le foret pilote jusqu'à la profondeur souhaitée.

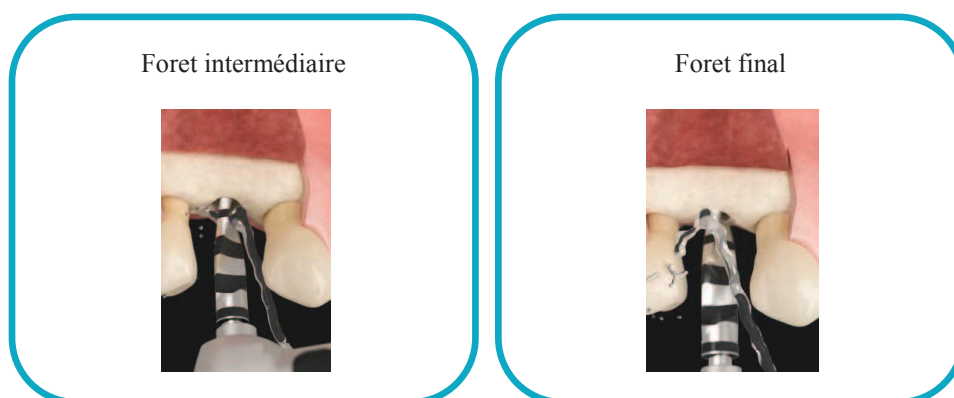
Figure 4-7 : Illustration du passage du foret pilote



L'étape suivante consiste à passer dans le puits de forage un ou plusieurs forets intermédiaires suivant les recommandations du fabricant de l'implant choisi (figure 4-8). L'objectif est d'élargir le diamètre du puits de forage aux dimensions correspondants à l'implant retenu tout en conservant l'orientation axiale déterminée.

Le passage du foret final achève la réalisation du puits de forage (Figure 4-8). Il assure les dimensions finales du puits en rapport avec les caractéristiques de l'implant retenu. Il est d'un diamètre supérieur au(x) foret(s) intermédiaire(s) mais inférieur au diamètre de l'implant afin d'assurer sa stabilité dans l'os.

Figure 4-8 : Illustration d'un foret intermédiaire et d'un foret pilote



La création de l'évasement constitue l'avant-dernière étape. Pour le praticien, il s'agit de créer un évasement dans la partie supérieure du puits de forage de manière à faciliter l'insertion de l'implant. Cette étape n'est pas toujours nécessaire en fonction des caractéristiques de l'os et de la forme de l'implant. Lorsqu'elle est réalisée, elle s'effectue avec un foret d'évasement dont la première partie n'est pas travaillante (c'est-à-dire qui ne coupe pas) ce qui permet au foret d'être inséré dans le puits de forage sans modifier

l'angulation établie. La seconde partie de ce foret est travaillante et permet d'évaser le sommet du puits de forage. La Figure 4–9 illustre le passage du foret d'évasement.

Figure 4–9 : Illustration du passage du foret d'évasement



Le taraudage achève la phase de forage. Il s'agit ici de créer un filetage dans le puits de forage favorisant l'installation de l'implant (Figure 4–10). Il est réalisé à une vitesse de rotation lente (entre 15 et 30 tours/minutes) alors que la vitesse de rotation est élevée lors du passage des autres forets (entre 800 et 2000 tours/minutes). Cette étape n'est pas nécessaire lorsque l'implant est de type auto-taraudant ou lorsque l'os du patient est de faible densité.

Figure 4–10 : Illustration de l'étape de taraudage



Une fois la séquence de forage réalisée, le dentiste nettoie au sérum physiologique le site implantaire afin d'enlever tous les débris et vérifier que la cavité osseuse est sanguinolente. Ce caractère sanguinolent de la cavité osseuse est un élément déterminant. En effet, la présence de sang signifie que l'os n'est pas nécrosé et que l'ostéointégration³² de

³² Ostéointégration : recouvrement progressif de l'implant par des cellules osseuses naturelles, qui permet la fixation définitive de l'implant

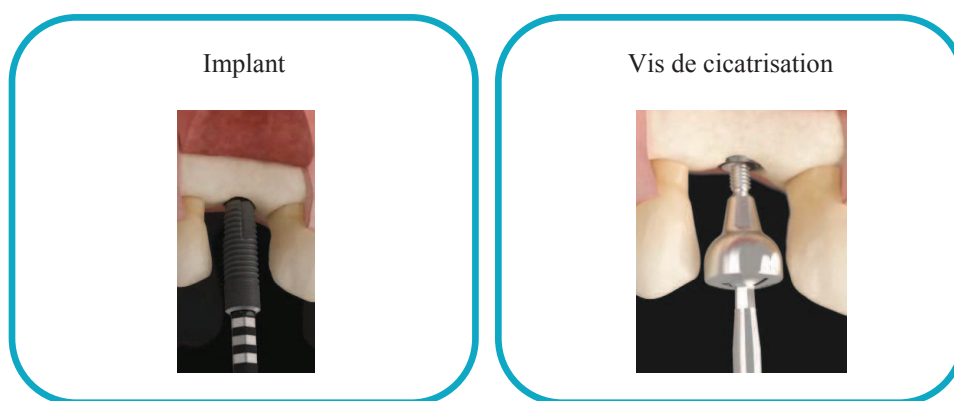
l'implant dans l'os pourra avoir lieu. A la fin de cette étape, le puits de forage est prêt pour recevoir l'implant³³.

2.1.3) La mise en place de l'implant

L'objectif de cette étape est d'installer l'implant dans le puits foré. Le praticien peut utiliser un contre-angle pour réaliser cette installation de manière motorisée. Il est recommandé dans ce cas d'utiliser une vitesse lente comprise entre 15 et 30 tours/minute et un torque³⁴ compris entre 30 et 50 newtons. Mais le praticien peut aussi installer l'implant à l'aide d'une clé dynamométrique dite à cliquet indiquant la force appliquée lors du vissage de l'implant dans le puits de forage. Certains praticiens utilisent une combinaison de ces deux techniques en commençant par la technique motorisée et en finissant par la clé à cliquet pour ajuster précisément l'enfouissement de l'implant dans l'os (distance entre le sommet de l'implant et le sommet de la crête osseuse). Concrètement, après avoir été installé sur le contre-angle ou la clé à cliquet, l'implant est vissé dans le puits de forage jusqu'à la profondeur déterminée, tout en respectant l'orientation du puits de forage (Figure 4–11).

L'intervention chirurgicale se termine par la mise en place d'une vis de cicatrisation (Figure 4–11), par la suppression des aspérités osseuses et par la suture de la gencive.

Figure 4–11 : Illustration de la mise en place de l'implant et de sa vis de cicatrisation

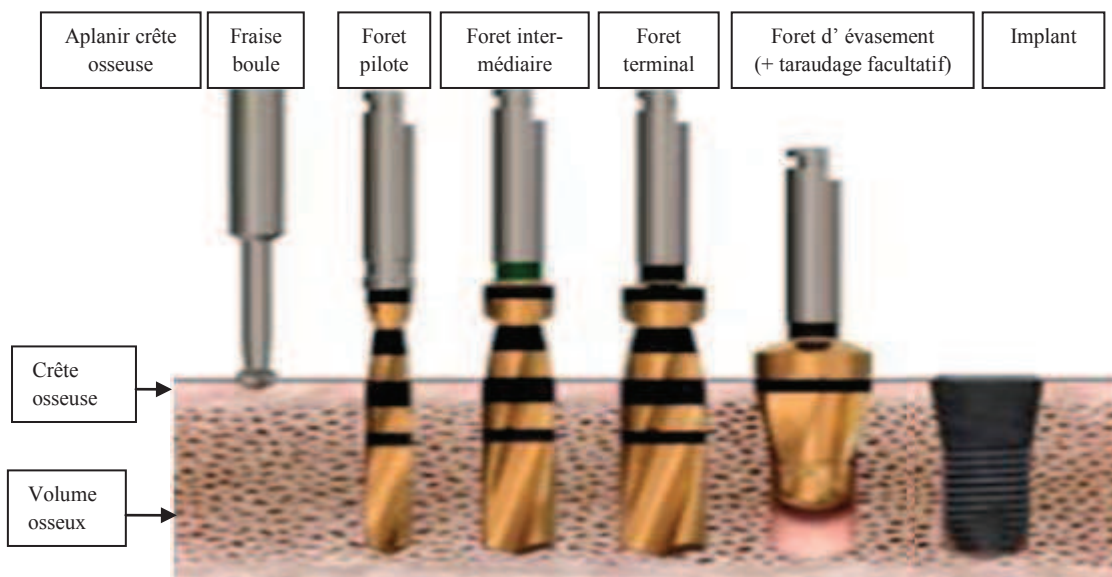


La Figure 4–12 résume les différentes phases de l'intervention chirurgicale en implantologie dentaire de l'aplanissement de la crête osseuse à l'installation de l'implant.

³³ Remarque, selon les situations cliniques, le dentiste peut utiliser un guide chirurgical. Le guide chirurgical est une gouttière plastique percée de part en part qui permet de transférer le résultat de la planification (axe et positionnement de l'implant) dans la bouche du patient. Le guide va donc contraindre le geste du dentiste dans le but de limiter les risques. Cependant, notre travail étant tourné en partie vers l'apprentissage d'habiletés motrices, nous ne souhaitons pas utiliser ce type d'aide dans notre EVAH.

³⁴ Force maximale appliquée sur l'implant. Au-delà de cette force, le contre-angle se bloque et arrête de visser.

Figure 4–12 : Illustration de l'intervention chirurgicale en l'implantologie



L'analyse de la tâche a indiqué les étapes à suivre ainsi que les indicateurs significatifs pour les réaliser. L'analyse de la tâche fonctionne donc en étapes successives. L'analyse de l'activité va étudier les stratégies développées par des chirurgiens-dentistes en situation réelle d'intervention pour réaliser cette tâche. Nous présentons l'analyse de l'activité dans la partie suivante.

3) Analyse de l'activité

3.1) Participants

Dix dentistes masculins experts en implantologie ont participé de manière volontaire et sans rémunération à notre étude. Ils ont été recrutés dans l'ouest de la France et ont été choisis de manière à disposer d'un panel de praticiens et de cas cliniques reflétant le plus possible la diversité des interventions. Praticiens et type d'interventions sont présentés dans le Tableau 4–1 en fonction de cinq critères : la latéralité du dentiste, l'expérience en implantologie, la formation suivie par le dentiste (lieu de la formation initiale et lieu et type de formation spécifique pour l'implantologie³⁵), type d'intervention et secteur dentaire concerné.

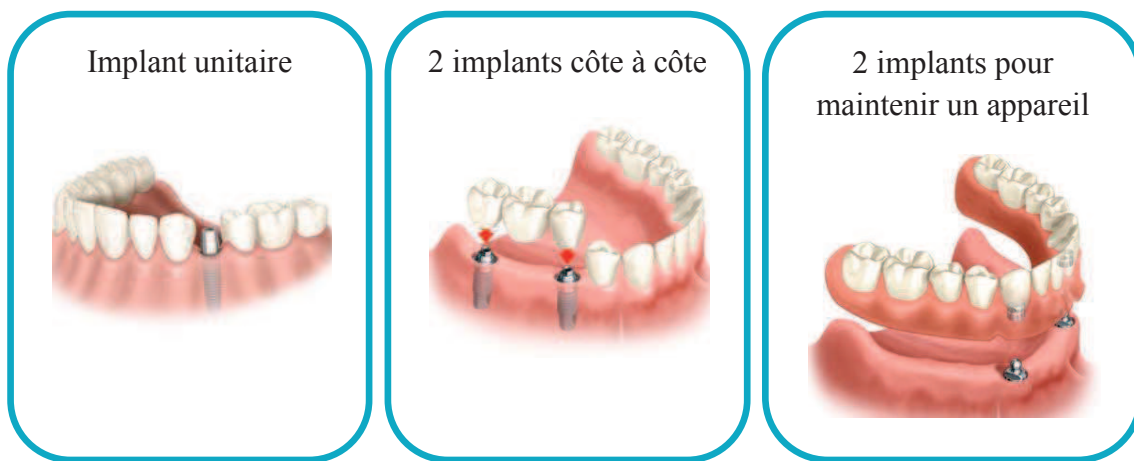
³⁵ La formation d'implantologie n'étant pas obligatoire pour exercer, les dentistes de l'étude ne présentent pas tous le même cursus de formation (Diplôme Universitaire, formation privée, colloque, conférence, lecture personnelle).

Tableau 4-1 : Étude démographique de l'échantillon

N°	Latéralité	Formation initiale en dentisterie	Formation initiale en implantologie	Expérience en implantologie	Type d'intervention	Secteur concerné
1	Droitier	Nantes	Pas de formation initiale	16 ans (150 implants/an)	2 implants côte à côte	1
2	Gaucher	Nantes	Pas de formation initiale	20 ans (100 implants/an)	Implant unitaire	2
3	Droitier	Paris	Formation interne Zimmer + DU Corte	7 ans (115 implants/an)	Implant unitaire	4
4	Droitier	Rennes	Certificat d'étude supérieur obtenu au Canada	4 ans (100 implants/an)	2 implants côte à côte	1
5	Gaucher	Rennes	DU Angers et Brest	8 ans (300 implants/an)	2 implants pour maintenir un appareil dentaire	3 et 4
6	Gaucher	Brest	Colloques + livres spécialisés	6 ans (20 implants/an)	Implant unitaire	4
7	Droitier	Paris	Formations privées	7 ans (100 implants/an)	Implant unitaire	1
8	Droitier	Rennes	DU Rennes	7 ans (80 implants/an)	2 implants côte à côte	3
9	Droitier	Rennes	Pas de formation initiale	20 ans (400 implants/an)	Implant unitaire	3
10	Droitier	Strasbourg	DU Brest	6 ans (50 implants/an)	Implant unitaire	3

Comme l'indique le tableau ci-dessus, tous les dentistes ont posé cent implants. Dans la profession, une règle implicite consiste à dire qu'un praticien est expert en implantologie lorsqu'il totalise une centaine d'opérations. Par conséquent tous les dentistes de l'étude peuvent être considérés comme expert. De plus, sept interventions concernaient la pose d'un implant unitaire encastré entre deux dents, deux interventions consistaient à poser deux implants côte à côte, et une intervention consistait à poser deux implants sur une mandibule édentée dans le but de fixer un appareil dentaire. La Figure 4–13 illustre ces trois types d'interventions. Enfin, trois interventions se sont déroulées en secteur 1, une intervention en secteur 2, quatre interventions en secteur 3, trois interventions en secteur 4. La Figure 4–2 (p.90) explique la correspondance entre le numéro du secteur et la localisation dans la bouche.

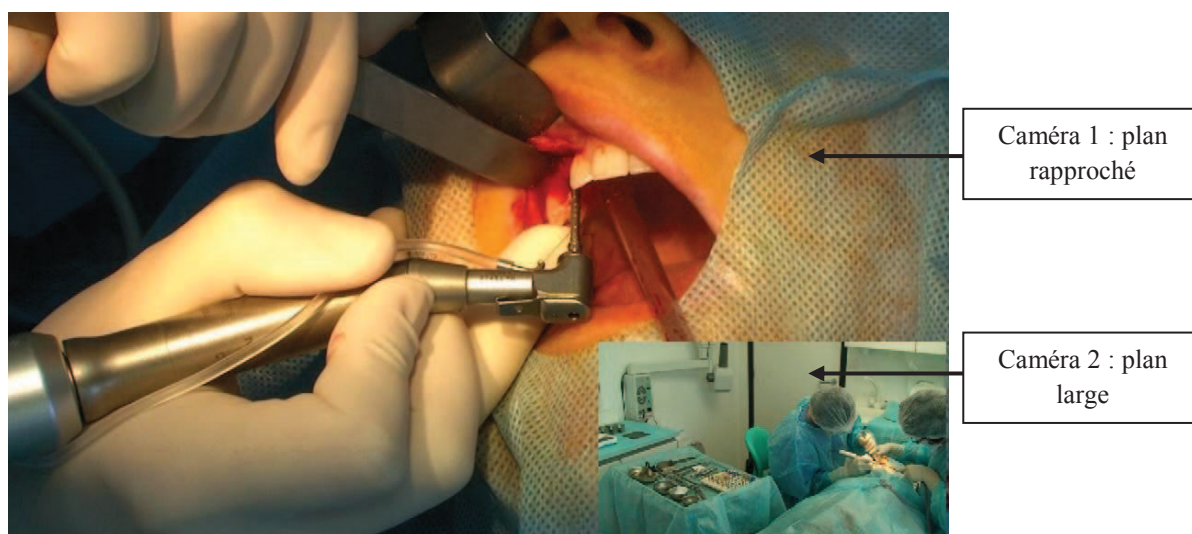
Figure 4–13 : Illustrations des trois types d'interventions observées



3.2) Procédure de recueil des données

Chaque intervention a été filmée en utilisant deux caméras de manière à disposer de l'ensemble de l'activité du praticien dans la bouche du patient (plan rapproché) et en dehors de la bouche du patient (plan large). À la fin de chaque intervention, nous avons réalisé un montage pour faire coïncider les deux vidéos obtenues. La Figure 4–14 illustre ce montage. Un accord de confidentialité a été signé entre le dentiste, le patient et le chercheur stipulant que les séquences vidéos étaient à usage strict de notre recherche et ne seraient en aucun cas diffusées publiquement.

Figure 4–14 : Illustration du montage des séquences vidéos



A la suite de l'intervention et dans un délai maximum de 24 à 48 heures, les praticiens ont participé à un entretien d'explicitation. Le but de ces entretiens est d'accéder aux stratégies mobilisées par les chirurgiens-dentistes pour réaliser la tâche, car la vidéo de leur activité au cours de l'intervention n'est pas à elle seule suffisante pour y accéder. En effet, les échanges verbaux au cours des interventions sont très peu nombreux. Il s'agit le plus souvent de courts échanges entre le praticien et son assistant(e) ou entre le praticien et le patient pour s'assurer généralement de son confort.

Plus précisément, lors de ces entretiens, nous avons fait le choix de nous munir des traces vidéos des interventions de manière à conduire des entretiens d'explicitation en situation d'autoconfrontation (Von Cranach et Harré, 1982). La première partie de l'entretien a été consacrée à recueillir un ensemble de données sur le praticien (formation, expérience, latéralité). La seconde partie visait à recueillir des informations sur le type d'intervention (historique du cas, choix implantaire, description de la planification réalisée, choix des implants). La dernière partie était directement consacrée à l'auto-confrontation. Pour chaque entretien, le chercheur disposait d'un guide d'entretien semi-directif. D'un entretien à un autre, ce guide d'entretien était identique pour les deux premières parties, mais évoluait pour la troisième partie dans le but de s'adapter à chaque chirurgie. Nous présentons ce guide d'entretien en annexe (p.209).

Il nous semble important de détailler cette troisième phase de l'entretien, où le chercheur et le dentiste visionnent ensemble la vidéo de l'intervention. Au cours de cette visualisation, le dentiste est invité à décrire et à commenter son activité. Le dentiste ou le chercheur peuvent arrêter le défilement de la vidéo et revenir en arrière. La confrontation du dentiste aux traces audiovisuelles de son activité permet de favoriser le rappel des éléments effectivement mobilisés lors de la chirurgie. Le but étant d'accéder aux stratégies des praticiens, le chercheur effectuait des relances concernant :

1) le but de l'étape en cours (Quel est votre but pour cette étape ? Que cherchez-vous à faire ?) ;

2) les indices (visuels, tactiles, auditifs) permettant de décider des actions à réaliser en fonction de l'étape (Qu'est-ce que vous regardez ? Qu'est-ce que vous ressentez lorsque vous effectuez ce geste ? Quelle(s) information(s) vous permet(tent) de décider de réaliser telle ou telle action ? A ce moment précis, de quelle(s) information(s) avez-vous besoin ?) ;

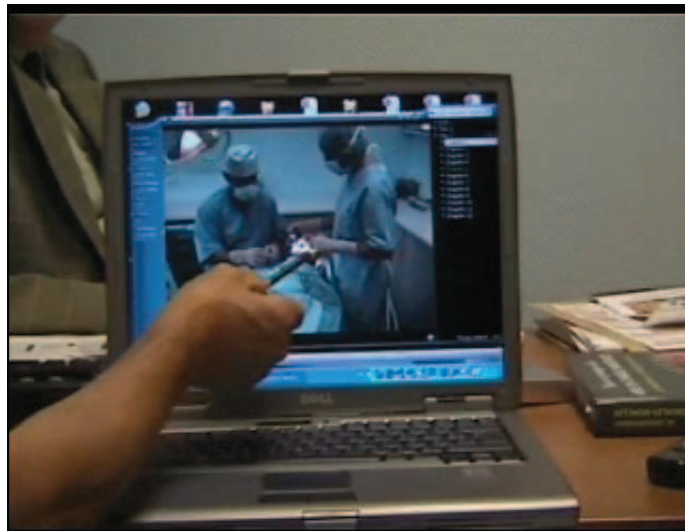
3) les indices d'évaluation permettant de déterminer si l'étape est terminée et ou réussie (Quelle(s) information(s) vous permet(ent) d'évaluer votre action ?) ;

4) l'explicitation des dilemmes présents dans l'action c'est-à-dire la prise en compte de certains paramètres (contradictaires) pour réaliser une action (Qu'est-ce qui vous préoccupe ? A quoi pensez-vous ? Quelle est la problématique de cette étape ?).

Ces relances ont porté essentiellement sur les actions qui étaient significatives (et par conséquent décrites et explicitées) pour les dentistes au cours de la chirurgie et sur des événements pour lesquels le chercheur souhaitait obtenir des informations complémentaires. Enfin, tous les entretiens ont été réalisés par un même chercheur qui avait déjà réalisé de tels entretiens au cours de précédentes études.

Les verbalisations des entretiens ont été enregistrées à l'aide d'une caméra filmant les participants ainsi que l'écran diffusant la vidéo de l'intervention chirurgicale (Figure 4–15).

Figure 4–15 : Illustration de l'enregistrement vidéo d'un entretien d'auto-confrontation



3.3) Analyse des données

Les entretiens ont été intégralement retranscrits (cf. annexe en ligne³⁶). Les première et seconde parties de l'entretien ont été utilisées pour caractériser le praticien et le type d'intervention. La troisième partie a été analysée en mobilisant la méthode d'analyse à l'aide de catégories conceptualisantes présentée par Paillé et Mucchielli (2008). Cette méthode permet de théoriser des phénomènes étudiés sans qu'il y ait de décalage entre l'annotation du corpus et la conceptualisation des données. Nous avons choisi cette méthode d'analyse car notre but est d'identifier les concepts organisateurs de l'activité, c'est-à-dire des concepts-en-acte (les concepts mobilisés dans l'action). Or cette méthode permet justement de conceptualiser précisément l'activité d'un sujet en catégories, en étant le plus proche possible de ses actions et surtout de l'interprétation de ses actions grâce aux verbatim retranscrits. Par conséquent, c'est grâce à la conceptualisation de l'activité du sujet qui nous pourrions identifier les concepts mobilisés par celui-ci dans l'action.

Comme toute méthode d'analyse qualitative, l'analyse par catégories conceptualisantes a pour préalable la réalisation d'un examen phénoménologique des données (Paillé et Mucchielli, 2008). Nous présenterons donc cette sous-partie en deux points : 1) l'examen phénoménologique des données, 2) l'identification des catégories conceptualisantes.

3.3.1) Examen phénoménologique des données

L'examen phénoménologique des données consiste à décrire le plus fidèlement possible les entretiens d'autoconfrontation réalisés. Il s'agit selon Paillé et Mucchielli d'un exercice combiné « *de lecture, d'annotation et de reconstruction* » (Paillé et Mucchielli, 2008, p.89). En réalité, cet examen débute lors de la réalisation des entretiens. Nous l'avons conduit en quatre temps : 1) adopter une attitude phénoménologique durant le recueil des données ; 2) réaliser une série de lecture et de relecture des entretiens réalisés ; 3) produire des énoncés pour cerner l'essence des entretiens ; 4) réaliser des récits phénoménologiques.

Durant les entretiens, nous avons été à l'écoute active des praticiens en leur laissant le plus possible la parole et en mobilisant des questions de relances à partir de leurs propos. Une fois les entretiens retranscrits, nous avons relu à plusieurs reprises chaque entretien guidé par les questions du type « Qu'est-ce qui est exprimé ici ? », « Qu'est-ce qui est mis en avant ? », « Qu'est-ce qui est important ? ». Nous avons vécu cette étape comme une imprégnation des données. Nous avons ensuite rédigé pour chaque entretien un récit réduit de l'activité du praticien centré sur les éléments significatifs de cette activité.

Le but de cet examen phénoménologique n'est pas d'analyser mais de décrire le plus fidèlement possible les entretiens réalisés pour s'en imprégner. Nous considérons cette étape comme « *une activité qui permet véritablement un ancrage empirique si important dans une analyse qualitative* » (Paillé et Mucchielli, 2008, p.94). Cependant, cette étape ne suffit pas et

³⁶ Le lien internet pour télécharger la retranscription des entretiens sera bientôt disponible

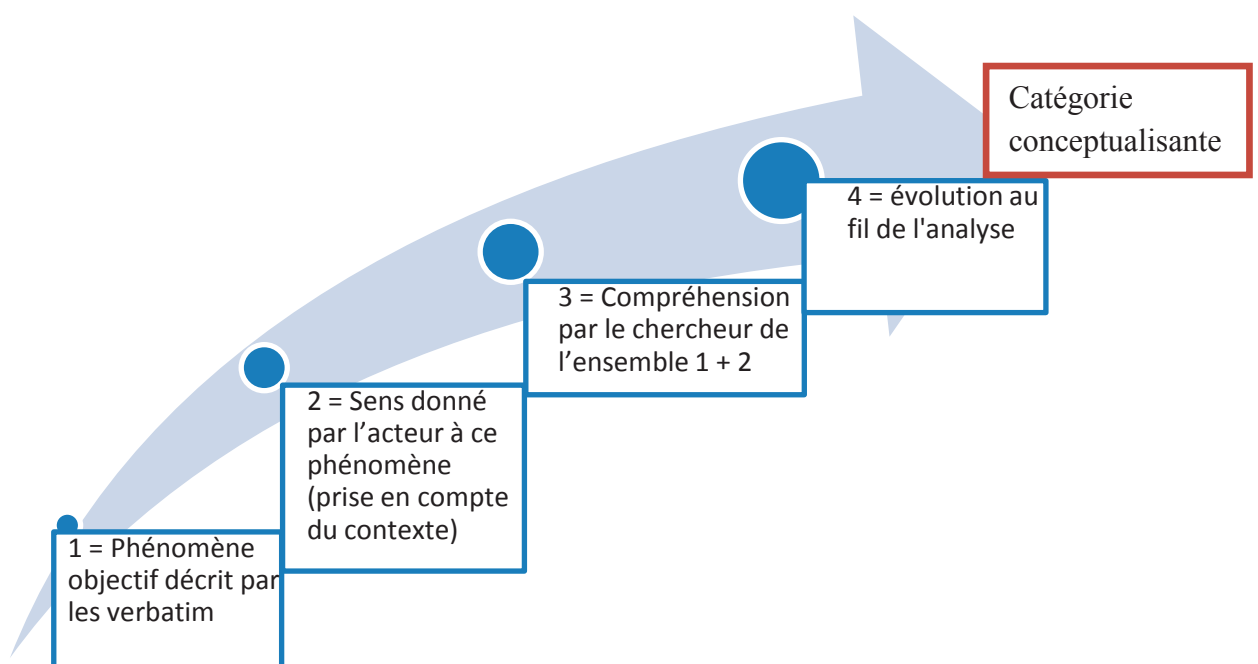
une analyse à l'aide des catégories conceptualisantes est nécessaire pour identifier la structure conceptuelle de la situation.

3.3.2) Identification des catégories conceptualisantes

Une catégorie conceptualisante est définie par Paillé et Mucchielli (2008) comme « une production textuelle se présentant sous la forme d'une brève expression et permettant de dénommer un phénomène perceptible à travers une lecture conceptuelle d'un matériau de recherche » (Paillé et Mucchielli, 2008, p.233).

Une catégorie conceptualisante met en relation des événements (phénomènes) et des contextes pour faire émerger le sens donné par l'acteur aux événements. Mais elle dépasse l'analyse stricte des entretiens pour laisser transparaître la compréhension que le chercheur en fait. Elle permet donc de répondre, directement en quelques mots, à la question : « Compte tenu de la problématique de recherche, quel est ce phénomène ? Comment puis-je le nommer conceptuellement ? ». Finalement, nous définissons la catégorie conceptualisante comme la manière dont le chercheur, en fonction de sa problématique, comprend dans un ensemble, le phénomène et le sens que l'acteur donne à ce phénomène. Cette catégorie évolue ou s'affirme au fil de l'analyse. La Figure 4-16 présente les différentes étapes que nous avons mobilisées pour passer des verbatim aux catégories conceptualisantes.

Figure 4-16 : Illustration du passage des verbatim à la catégorie conceptualisante



Les paragraphes suivants vont nous permettre d'expliciter cette démarche à travers un exemple.

Phénomène décrit par le verbatim : *«avant de forer le puits, souvent j'aplanie la crête, très souvent, on est obligé d'aplanir, parce que c'est les montagnes russes où alors on a une crête en lame de couteau... il va falloir que je coupe, pour avoir plus de largeur mais il faut faire attention parce que l'on perd de la hauteur. C'est exactement ça que je fais sur la vidéo. J'aplanis perpendiculairement à mon futur implant. Vous comprenez bien que lorsque j'ai ça (il fait un dessin), je ne vais pas l'aplanir horizontalement, je vais l'aplanir comme cela, perpendiculairement à l'axe du forage, pour pouvoir forer sur quelque chose d'à peu près plat. Parce que c'est rarement plat... » (dentiste n°2).*

Sens donné par le dentiste : à travers ce passage, le dentiste cherche à obtenir une surface suffisamment plane et large pour poser l'implant, ce qui traduit la volonté de préparer le site implantaire. Mais cela ne s'arrête pas là, car il fait attention à ne pas enlever trop d'os lors de la préparation du site implantaire.

Compréhension par le chercheur : de cet ensemble de verbatim – sens donné par le dentiste, nous comprenons 1) qu'il existe un dilemme entre la quantité d'os à enlever pour préparer correctement le site implantaire et la quantité d'os qu'il doit rester pour que l'implant puisse s'insérer sur toute sa longueur dans la mâchoire ; 2) que ce dilemme guide l'action du dentiste lors de la phase de préparation.

Évolution ou confirmation au fil de l'analyse : La poursuite de l'analyse nous permet de faire évoluer notre compréhension du phénomène. En effet grâce au verbatim suivant : *« Je me suis dit que quand je vais mettre mon implant, je vais avoir les spires externes qui seront à ras de l'os et les spires internes qui seront un peu plus enfoncées. Donc je vais avoir de l'os qui va me gêner. Donc j'ai pris la décision de prendre la fraise boule pour aplanir complètement ça. »,* nous nous apercevons de la volonté du dentiste de prendre en compte, dès l'étape de préparation du forage, l'étape de mise en place de l'implant dans l'os. Ce qui renvoie à la notion d'enfouissement de l'implant c'est-à-dire à la distance entre le sommet de l'implant et le sommet de la crête osseuse. Le dentiste anticipe donc l'enfouissement de l'implant dès la phase de préparation du site implantaire. De plus, l'analyse de verbatim supplémentaires va confirmer le fait que c'est bien le dilemme quantité d'os à supprimer versus hauteur d'os à conserver qui va guider l'action pour aplanir la crête osseuse : *« il faut, pas que j'en laisse, pas que j'en tire de trop. Parce qu'après je s'rai handicapé pour calculer l'émergence de mon implant. » (dentiste 8).*

Catégorie conceptualisante : À ce moment de l'analyse, nous avons donc défini une première catégorie conceptualisante nommée « enfouissement ». Cette catégorie traduit la volonté du dentiste de régler précisément la distance entre le sommet de l'implant et le sommet de la crête osseuse. Cette catégorie intervient à différentes étapes de la chirurgie comme la phase de préparation du forage (aplanir la crête osseuse), la phase de mise en place de l'implant dans l'os (régler la distance entre le sommet de l'implant et le sommet de la crête osseuse) mais aussi, durant l'intégralité de la séquence de forage car le dentiste s'assure, pour chaque foret utilisé, d'obtenir la profondeur souhaitée pour le puits de forage (si le puits de

forage n'est pas assez profond, le dentiste ne pourra pas suffisamment enfouir l'implant dans l'os).

3.3.3) Des catégories conceptualisantes à la structure conceptuelle de la situation

Nous allons maintenant expliciter le lien entre les catégories conceptualisantes et les différents composants de la structure conceptuelle de la situation c'est-à-dire, les concepts organisateurs, les variables et les indicateurs. Pour ce faire, nous mobilisons trois idées principales. 1) Une catégorie est un concept de haut-niveau sous lequel l'analyste groupe les concepts de faible niveau en fonction de leurs propriétés communes (Corbin et Strauss, 2008). 2) Une catégorie conceptuelle prend le statut de concept organisateur de l'activité si elle permet de diagnostiquer la situation et de guider l'action. 3) Les concepts organisateurs sont les catégories conceptuelles du plus haut niveau possible.

Par conséquent, nous définissons une catégorie conceptuelle pour un type de phénomène. Puis au fil de l'analyse, cette catégorie conceptuelle va progresser et s'affiner à un plus haut niveau de généralité explicative ou au contraire régresser vers un niveau inférieur en fonction du contenu des verbatim analysés à la suite (confirmation ou infirmation de la théorisation émergente). À partir d'un certain point, le travail d'analyse consiste donc à confronter l'ensemble des catégories conceptuelles identifiées pour, soit créer des catégories conceptuelles d'un niveau supérieur, soit asseoir une catégorie conceptuelle existante comme étant une catégorie d'un niveau maximal. À la suite de cette confrontation et de ce regroupement en fonction de propriétés communes, les catégories conceptuelles obtenues sont les concepts organisateurs de l'activité. Les sous-catégories ayant permis de construire un concept organisateur prennent le statut de variables du concept organisateur.

Dans notre exemple, la catégorie conceptuelle « enfouissement » a finalement pu être associée à deux autres catégories conceptuelles identifiées (« axe » et « localisation ») pour construire le concept organisateur « d'émergence » qui témoigne du positionnement de l'implant dans l'os. Les catégories conceptuelles « enfouissement », « axe », « localisation » sont devenues des variables de ce concept organisateur « d'émergence ».

De plus, comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3, les indicateurs sont les observables naturels ou instrumentés qui permettent de donner une valeur actuelle aux variables. Par conséquent pour déterminer les indicateurs, nous avons cherché dans les verbatim, les informations que les dentistes prélevaient pour donner une valeur à la variable.

Reprenons notre exemple de la catégorie conceptualisante « enfouissement » devenue une variable. Le verbatim « *Je me suis rendu compte que le haut de la crête n'était pas horizontal. Donc je me suis dit que quand je vais mettre mon implant, je vais avoir les spires externes qui seront à ras de l'os et les spires internes qui seront un peu plus enfoncées* » (dentiste n°8) nous a conduit à considérer qu'en fonction de la forme de la crête osseuse, le dentiste va d'une part, aplanir ou non la crête osseuse et d'autre part, anticiper sur le résultat

de l'enfouissement. Nous avons donc nommé « forme de la crête osseuse » le premier indicateur de la variable « enfouissement ».

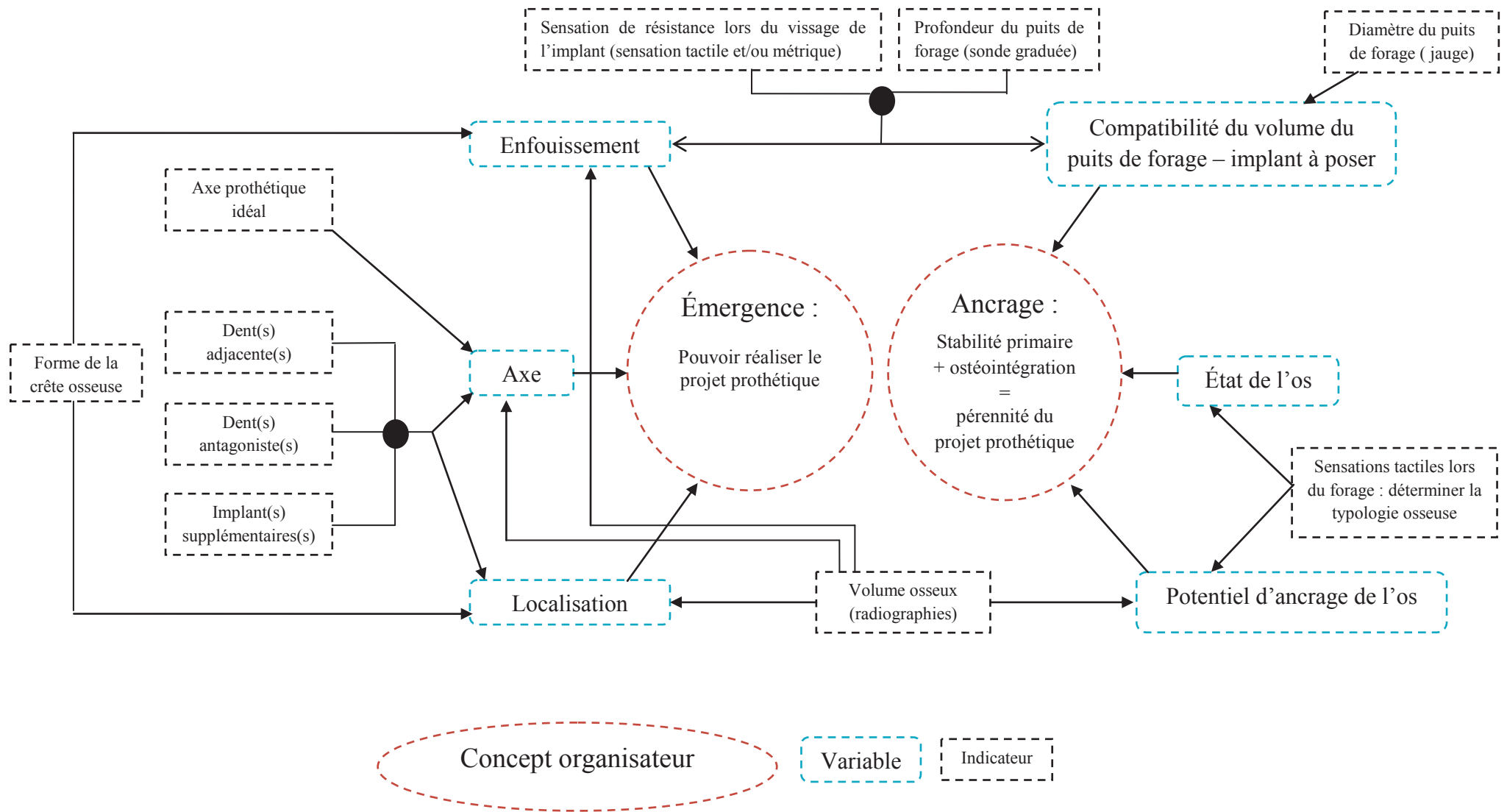
De la même manière, nous avons identifié le « volume osseux » c'est-à-dire le volume d'os disponible à l'endroit du site implantaire comme un second indicateur. En effet, plus ce volume est important en rapport avec la longueur de l'implant, plus le chirurgien-dentiste pourra enlever d'os lors de la phase d'aplanissement de la crête osseuse. Le troisième indicateur identifié fut « la profondeur du puits de forage » car si le puits de forage n'est pas assez profond, le dentiste ne pourra enfouir l'implant comme il souhaite. Le quatrième indicateur identifié fut la « sensation de résistance lors du vissage de l'implant ». Cet indicateur témoigne d'un deuxième dilemme à prendre en compte. En effet, le dentiste doit réaliser un compromis entre l'enfouissement envisagé lors de la planification et la sensation de résistance lors du vissage de l'implant (qui témoigne de la stabilité de l'implant dans l'os). Car, pour améliorer la stabilité de l'implant dans l'os, le dentiste peut être amené à visser un peu plus l'implant que recommandé, ce qui entraîne un enfouissement supplémentaire par rapport à ce qui avait été défini lors de la planification : *« à 30 newton, le moteur ne s'est pas arrêté donc j'ai continué de visser et paf, il s'est arrêté là. Mais je l'ai un peu plus enfoui »* (dentiste n°8).

Nous obtenons ainsi quatre indicateurs qui renseignent la variable « enfouissement » renseignant elle-même le concept organisateur « d'émergence ». Cette analyse a été mobilisée sur l'ensemble des données pour déterminer la structure conceptuelle de la situation. Nous en avons assuré la validité en comparant et ajustant lorsque nécessaire les analyses séparées de trois chercheurs sur les mêmes données.

4) Résultats : identification de la structure conceptuelle de la situation

La Figure 4–17 présente la structure conceptuelle de la situation identifiée suite à notre analyse.

Figure 4-17 : Structure conceptuelle de la situation obtenue pour l'implantologie dentaire



Cette structure conceptuelle de la situation (SCS) est organisée autour de deux concepts organisateurs : l'émergence et l'ancrage. Nous les développons successivement en rapport avec leurs variables et indicateurs.

4.1) L'émergence comme dimension visible

Le concept « d'émergence » fait référence à la partie visible de l'implant (émergente de l'os et de la gencive). Il renvoie pour le praticien à ce qui est visible et observable. Le praticien « voit » l'émergence de l'implant à la fin de son intervention.

Ce concept organisateur de l'activité des praticiens est en relation directe avec le projet prothétique dégagé dans la phase de planification. En effet, un projet prothétique repose sur la capacité du praticien à positionner un implant à un endroit précisément déterminé. Pour autant, le concept d'émergence ne se réduit pas à la simple localisation de l'implant. Il dépend aussi de l'axe de l'implant et de son enfouissement dans l'os. Dans la structure conceptuelle de la situation, le concept d'émergence subit ainsi l'influence de trois variables : la localisation, l'axe et l'enfouissement.

En effet, la localisation, l'axe et l'enfouissement ressortent comme les éléments fondamentaux de l'intervention des praticiens affectant l'émergence finale de l'implant. Ces trois variables sont définies lors de la phase de planification.

L'objectif de l'intervention chirurgicale au travers du concept « d'émergence » est donc de réaliser un puits de forage accueillant l'implant et dont les caractéristiques respectent au maximum les valeurs définies durant la phase de planification. Pour atteindre cet objectif, le dentiste mobilise plusieurs indicateurs permettant de donner une « valeur » aux différentes variables.

4.1.1) La variable « localisation » et ses indicateurs

La variable « localisation » correspond à l'endroit précis où l'implant émerge de l'os. Elle est affectée par cinq indicateurs :

- La ou les dent(s) adjacente(s) : les dents adjacentes servent de repères aux praticiens pour déterminer la localisation de l'implant. Comme l'un des praticiens le souligne « *Le point d'impact, il faut qu'il soit central par rapport aux dents adjacentes. Donc là je me sers de mes repères, qui sont les dents d'à côté* » (dentiste n°7). Le dentiste utilise une sonde graduée pour la mesurer ;
- Le ou les implant(s) supplémentaire(s) : dans le cas de la pose de plusieurs implants côte à côte, le centre d'un implant peut constituer un indicateur pour le centrage de l'implant voisin. Un praticien indique « *je vois ma distance [...] ma distance* »

d'implant à implant, de centre d'implant à centre d'implant » (dentiste n°4). Le dentiste utilise également une sonde graduée pour la mesurer ;

- La dent antagoniste : la dent antagoniste consiste aussi un indicateur à la localisation de l'implant. La relation entre émergence de l'implant et dent antagoniste assure le phénomène d'occlusion entre mâchoire supérieure et mâchoire inférieure. Comme l'indique un praticien « *Je fais fermer la bouche, car c'est là que je vois où est-ce que je suis par rapport aux dents antagonistes* » (dentiste n°4). Pour ce faire, le dentiste n'utilise pas d'outil de mesure, mais visualise mentalement la concordance entre la future prothèse et la dent antagoniste ;
- La forme de la crête osseuse : une crête osseuse plane facilite la réalisation de la séquence de forage. Par conséquent, le dentiste favorise une zone plane ou va aplanir la crête osseuse avant de commencer la séquence de forage ce qui peut, dans certains cas, modifier la localisation initialement prévue lors de la planification « *j'ai une forme de crête qui est suffisamment développée pour me dire que de toute façon, j'ai pas le choix, c'est au centre de la crête qu'il faut que je pose l'implant* » (dentiste n°8) ;
- Le volume osseux : le volume osseux est visible et mesurable sur les examens radiographiques réalisés en phase de planification et disponibles durant la chirurgie. Cela permet au dentiste de se représenter la partie osseuse non visible. Par conséquent, en fonction du volume osseux disponible, le dentiste va sélectionner la localisation de l'implant.

4.1.2) La variable « axe » et ses indicateurs

La variable « axe » correspond à l'angulation de l'implant dans l'os. Elle est aussi influencée par cinq indicateurs :

- La ou les dent(s) adjacente(s) : le dentiste régule l'axe du puits de forage en observant l'axe des dents adjacentes : « *Je garde le même axe que la dent voisine* » (dentiste n°10). Pour ce faire, il insère une jauge dans le puits de forage de manière à visualiser son axe. Il n'utilise pas d'outils de mesure mais adopte différents points de vue pour mieux évaluer les axes. Il peut également demander l'avis de son assistante disposant d'un point de vue sur le site implantaire opposé au sien ;
- Le ou les implant(s) supplémentaire(s) : dans le cas de la pose de plusieurs implants côte à côte, le dentiste ajuste l'axe du puits de forage en observant l'axe des implant(s) supplémentaire(s). Pour ce faire, il utilise la même technique que précédemment ;
- La dent antagoniste : le dentiste ajuste l'axe du puits de forage en observant l'axe de la dent antagoniste : « *je vérifie mes axes par rapport aux dents voisines, aux dents*

antagonistes » (dentiste n°4). Pour ce faire, il utilise la même technique que précédemment ;

- L'axe prothétique idéal : le dentiste ajuste l'axe du puits de forage en comparant l'axe idéal défini pendant la planification à l'axe du puits de forage visualisé à l'aide d'une jauge. La comparaison se fait avec la même technique que précédemment ;
- Le volume osseux : le dentiste ajuste l'axe du puits de forage en observant le volume osseux sur les examens radiographiques affichés : *« Je regarde la radio pour reprendre l'axe »* (dentiste n°2). Cela permet au dentiste de se représenter la partie osseuse non visible.

4.1.3) La variable « enfouissement » et ses indicateurs

La variable « enfouissement » correspond à la distance entre le sommet de l'implant et la crête osseuse. Elle est influencée par trois indicateurs :

- La profondeur du puits de forage : de manière à enfouir l'implant à la profondeur déterminée, le praticien doit disposer d'un puits suffisamment profond. Il évalue cette profondeur grâce au marquage présent sur les forets ainsi qu'avec l'aide d'une sonde graduée ;
- La forme de la crête osseuse : l'enfouissement de l'implant est délicat lorsque la crête osseuse n'est pas plane car la distance entre le sommet de l'implant et la crête osseuse ne sera pas égale de part et d'autre de l'implant : *« Je me suis rendu compte que le haut de la crête n'était pas horizontal. Donc je me suis dit que quand je vais mettre mon implant, je vais avoir les spires externes qui seront à ras de l'os et les spires internes qui seront un peu plus enfoncées »*(dentiste n°8). Pour résoudre ce problème, le dentiste pourra aplanir la crête osseuse avant de débiter le forage ;
- La sensation de résistance lors du vissage de l'implant : le dentiste réalise un compromis entre l'enfouissement envisagé lors de la planification et la sensation de résistance lors du vissage de l'implant (sensation qui témoigne de la stabilité primaire de l'implant). Cette sensation peut être mesurée grâce à l'utilisation d'une clé dynamométrique. Pour améliorer la stabilité primaire, le dentiste peut être amené à visser un peu plus l'implant ce qui entraîne un enfouissement supplémentaire par rapport à ce qui avait été défini lors de la planification : *« à 30 newton, le moteur ne s'est pas arrêté donc j'ai continué de visser et paf, il s'est arrêté là. Mais je l'ai un peu plus enfoui »* (dentiste n°8).

On constate dans cette présentation que les indicateurs des variables sont de nature différente. Il peut s'agir soit d'indicateurs mesurés par des valeurs numériques à l'aide d'outils dentaires, soit d'indicateurs liés aux perceptions tactiles ou visuelles des praticiens.

De plus, pour transférer les informations de la planification à la bouche du patient, le dentiste a besoin de réaliser des reconstructions mentales pour faire correspondre les examens radiographiques (2D) avec la situation clinique (3D). Enfin, nous constatons que certains indicateurs influencent plusieurs variables en même temps. Par exemple, l'indicateur « forme de la crête osseuse » oriente les décisions en terme d'émergence en affectant deux variables : la localisation (« *j'ai une forme de crête qui est suffisamment développée pour me dire que de toute façon, j'ai pas le choix, c'est au centre de la crête qu'il faut que je pose l'implant* », dentiste n° 8) et l'enfouissement (« *faut que je retire ce qu'il faut, pas que j'en laisse, pas que j'en tire trop...* », dentiste n°8).

4.2) L'ancrage comme dimension invisible

Si le concept d'émergence renvoie à une dimension visible de l'activité des praticiens, le concept d'ancrage renvoie par contraste à une dimension « invisible » c'est-à-dire à une dimension que le praticien ne peut observer directement.

L'ancrage peut être défini comme la stabilité de l'implant à court et moyen terme. La stabilité à court terme correspond à la stabilité primaire : « *la stabilité primaire, c'est que votre implant, une fois qu'il est vissé, il est bloqué, il est en place* » (dentiste n°6). La stabilité à moyen terme est la stabilité obtenue après la phase de cicatrisation (3 à 6 mois selon les cas). Celle-ci doit permettre d'obtenir l'ostéointégration de l'implant, c'est-à-dire le recouvrement progressif de l'implant par des cellules osseuses naturelles, qui permet la fixation définitive de l'implant. Si l'ostéointégration est réussie, l'implant est solidement fixé : « *c'est du solide [...] mon implant est soudé* » (dentiste 8).

Par conséquent, le concept « d'ancrage » ne constitue pas comme « l'émergence » un résultat visible par le praticien. Il s'agit d'un résultat qu'il pourra apprécier, en partie, de façon différée dans le temps à travers l'ostéointégration. Notre étude montre que ce concept est moins décrit par les chirurgiens-dentistes que le concept « d'émergence » bien qu'il ressorte de notre étude comme essentiel. Pour autant, au cours de l'intervention, ils prennent un certain nombre de précautions pour assurer « l'ancrage » de l'implant.

L'ancrage subit l'influence de trois variables : « la compatibilité entre le volume du puits de forage réalisé et l'implant à poser », « l'état de l'os », et « le potentiel d'ancrage de l'os ». Ces trois variables prennent des valeurs au cours de l'intervention qui orientent l'activité du praticien.

4.2.1) La variable « compatibilité entre le puits de forage et l'implant à poser » et ses indicateurs

L'objectif associé à la variable « compatibilité entre le puits de forage et l'implant à poser » est de créer le volume (diamètre*longueur) adéquat du puits de forage en fonction de

l'implant sélectionné pour favoriser la stabilité primaire. Cette variable est influencée par trois indicateurs :

- La profondeur du puits de forage : Le dentiste évalue la profondeur du puits de forage grâce au marquage présent sur les forets et à une sonde graduée : *« j'ai un repère sur mon foret qui m'indique la profondeur »* (dentiste n°3).
- Le diamètre du puits de forage : Le dentiste évalue le diamètre du puits de forage grâce à l'insertion de jauges. Lors du forage, le dentiste fait attention à ne pas ovaliser le puits de forage, pour ne pas agrandir son diamètre : *« je vais surtout attention à ne pas évaser le puits »* (dentiste n°8) *« si tu évases le Bazard, du coup, tu n'as plus de stabilité pour l'implant »* (dentiste n°10).
- La sensation de résistance lors du vissage de l'implant : La compatibilité entre le puits de forage et l'implant à poser peut être évaluée durant l'intervention chirurgicale grâce à la sensation de résistance lors du vissage de l'implant. Cette sensation peut être uniquement tactile ou être mesurée grâce à une clé dynamométrique. La littérature indique qu'à partir d'une force de 30 newtons, le dentiste peut considérer que la stabilité primaire est obtenue : *« Il faut que votre implant bloque avec clé à 30-35 newtons, si votre pièce à main s'arrête, c'est bon. [...] Et si ça se met à dériper, vous arrêtez parce que y a pas de stabilité, et vous mettez votre implant à la poubelle »* (dentiste n°1).

4.2.2) La variable « état de l'os » et ses indicateurs

La variable « état de l'os » définit le niveau de cicatrisation de l'os et la vitalité des cellules osseuses. Cette variable prend systématiquement deux valeurs, une avant le début de la chirurgie et une pendant la chirurgie. En effet, si l'os a subi une intervention (greffe osseuse, extraction de dent, etc.) avant la pose d'implant et que la cicatrisation osseuse n'est pas terminée, l'ancrage s'opère difficilement. De plus, si l'os est surchauffé, nécrosé, traumatisé durant la séquence de forage, l'implant ne pourra pas s'ostéointégrer car les cellules osseuses constituant la paroi du puits sont détruites. Par conséquent l'objectif est, comme le souligne un praticien, *« d'élargir le puits de forage sans traumatiser l'os »* (dentiste n°6). Pour ce faire, les praticiens utilisent des mouvements de va-et-vient lors des forages et utilise une solution pour refroidir l'os en cours de forage.

Cette variable est influencée par deux indicateurs :

- Température osseuse : Pendant le forage, si la température de l'os augmente de dix degrés par rapport à la température initiale, cela signifie que l'os est nécrosé. Pour éviter ce phénomène les chirurgiens-dentistes réalisent des mouvements de « va-et-vient » : *« faut faire de mouvements de va-et-vient pour ne pas échauffer l'os »* (dentiste n°6). Cependant, cet indicateur n'est pas accessible aux chirurgiens-dentistes

car il n'existe pas d'outil pour mesurer la température osseuse au cours de l'intervention. C'est pourquoi, cet indicateur n'est pas présenté dans notre structure conceptuelle de la situation.

- Les sensations tactiles lors du forage : Le dentiste mobilise des perceptions tactiles au cours de la séquence de forage (os plus ou moins dur, différence de densité osseuse entre l'os natif et l'os greffé, vibration, à coup, blocage lors de mouvement de va-et-vient). C'est à partir de ses sensations tactiles et grâce à son expérience que le dentiste va donner une valeur à l'état de l'os.

4.2.3) Les indicateurs de la variable « Potentiel d'ancrage »

La variable « potentiel d'ancrage de l'os » correspond à un terme qui n'est pas employé par les chirurgiens-dentistes, nous l'avons construit. Il désigne la capacité de l'os à stabiliser l'implant puis à l'ostéointégrer. Cette variable est influencée par deux indicateurs :

- Le volume osseux : Le volume osseux est visible sur les examens radiographiques. De manière générale, nous pouvons dire que plus la quantité d'os est importante, plus le dentiste pourra poser un implant long de gros diamètre et plus l'ancrage de celui-ci sera facilité ;
- Les sensations tactiles lors du forage : Évaluer la typologie osseuse³⁷ (os de classe I, II, III, IV) est extrêmement important pour le dentiste dans la mesure où cela lui permet d'évaluer la quantité d'os cortical (c'est-à-dire l'épaisseur d'os dur). Plus la quantité d'os dur est importante plus l'ancrage sera facilité. Un praticien indique à ce sujet : « *ce qui va donner la stabilité primaire de mon implant, c'est la hauteur de la corticale* ». De plus, cette typologie peut seulement être supposée avant l'intervention à partir des examens radiographiques : « *j'ai déjà une notion de la classe de l'os que je vais rencontrer, grâce au scanner* » (dentiste n°2). Il s'agit donc pour le praticien de confirmer cette supposition grâce à ses sensations tactiles au cours de l'intervention. Ainsi, le praticien n'obtient une connaissance précise de la typologie osseuse qu'au cours de la phase de forage en s'appuyant sur ses sensations tactiles (dureté de l'os, sensation de ressaut, à coup, vibration, mouvement de va-et-vient plus ou moins fluide, force à appliquer pour forer l'os). Comme l'indique un praticien : « *là c'est une notion hyper-tactile. Et, c'est là, que je me rends compte si j'ai un os de densité importante ou non. Donc au ressenti, j'arrive à classer mon os* » (dentiste n°3).

La caractéristique de cette structure conceptuelle de la situation est les interactions entre les variables par l'intermédiaire des indicateurs. En effet, un même indicateur peut

³⁷ L'os est constitué d'os cortical et d'os alvéolaire. L'os cortical est dur alors que l'os alvéolaire est mou. Il existe une typologie des os : la classe I correspond à un os constitué uniquement d'os cortical, la classe II est constituée d'os cortical puis d'os alvéolaire, la classe III est constituée d'os cortical (en quantité moindre) puis d'os alvéolaire, la classe IV est constituée d'os alvéolaire.

renseigner plusieurs variables rattachées parfois à des concepts organisateurs différents. Par exemple, l'indicateur « profondeur du puits de forage » influence la variable « enfouissement » qui intervient sur le concept « d'émergence », et la variable « compatibilité du volume du puits de forage avec l'implant à poser » qui intervient sur le concept « d'ancrage ». Les indicateurs sont à la périphérie de la structure conceptuelle de la situation mais permettent de faire des liens entre les variables et par conséquent entre les concepts organisateurs. Les concepts d'émergence et d'ancrage ne sont donc pas séparés, ils sont au cœur d'un système complexe où interagissent indicateurs et variables.

Notre étude révèle donc que l'activité d'implantologie dentaire s'organise autour de deux concepts et d'un ensemble de variables et d'indicateurs. Pour expliciter ces deux concepts, nous utilisons la métaphore de l'iceberg. Le concept d'émergence représente la partie émergée de l'iceberg. Cette partie est observable, évaluable et objectivable par le praticien à l'issue de l'intervention. Le concept d'ancrage représente la partie immergée de l'iceberg. Cette partie n'est pas directement accessible au praticien. Il doit l'inférer à partir d'indicateurs indirects. Ces deux concepts peuvent parfois conduire à des décisions contrastées obligeant le praticien à résoudre des dilemmes pour obtenir le meilleur compromis.

Nous avons décrit ci-dessus la structure conceptuelle de la situation d'implantologie. Cependant, toutes les variables et indicateurs ne sont pas mobilisés en même temps au cours de l'intervention. Pour certaines interventions, ils ne sont pas tous mobilisés. Il existe donc une certaine flexibilité de cette structure en fonction du contexte de l'intervention. C'est ce que nous allons montrer dans la partie suivante.

4.3) Opérationnalisation de la structure conceptuelle de la situation

La structure conceptuelle de la situation va être opérationnalisée durant l'intervention. Nous distinguons deux phases d'opérationnalisation qui sont la phase « de forage » et la phase de « mise en place de l'implant ». De plus, nous verrons dans une troisième partie, le passage de la tâche prescrite à l'activité.

4.3.1) Opérationnalisation au cours de la phase de forage

Lors de la phase de forage, le dentiste va se préoccuper de cinq variables : la localisation, l'axe, l'enfouissement de l'implant, l'état de l'os et le potentiel d'ancrage de l'os. Nous détaillons successivement l'opérationnalisation de ces cinq variables.

La variable « localisation » est la préoccupation principale du dentiste expert lors de l'utilisation de la fraise boule. Comme l'indiquent plusieurs dentistes : « *ce qui est important, c'est où le foret sort* » (dentiste n°8), « *c'est juste passer la corticale, peut importe l'axe* » (dentiste n°5). L'objectif de passage de la fraise boule est donc de marquer la future localisation de l'implant, peu-importe l'axe. Cette préoccupation se poursuit légèrement lors de l'utilisation du foret pilote.

La variable « axe » est la préoccupation principale du dentiste expert lors du passage du foret pilote. De plus, comme le souligne un praticien : *« c'est un des moments les plus délicats parce que c'est ça qui va donner le futur axe de l'implant »* (dentiste n°2). Par conséquent, pour s'assurer d'obtenir un axe adéquat, le dentiste va procéder par étape : i) forage jusqu'à la moitié de la profondeur, ii) insertion d'une jauge pour évaluer l'axe, iii) poursuite du forage jusqu'à la profondeur souhaitée. Enfin, notons que cette variable continue d'avoir de l'importance lors du passage du deuxième, car l'axe du puits de forage est encore modifiable. Par la suite, cet axe est défini et le dentiste ne pourra plus le modifier, par conséquent la variable « axe » prend moins d'importance, ce qui se confirme dans les propos d'un dentiste par *« on peut encore changer les axes jusqu'au 2^{ème} foret après c'est fini. On ne peut plus que guider, que respecter ce qu'on a fait »* (dentiste n°3).

Bien que la variable « enfouissement » soit particulièrement présente dans la phase de « mise en place de l'implant », nous la retrouvons de manière implicite à deux moments dans la « phase de forage ».

D'une part, nous la retrouvons lorsque le dentiste doit aplanir la crête l'osseuse. En effet, l'idée sous-jacente pendant cet acte est d'obtenir une surface plane pour que l'implant puisse s'enfouir uniformément (même quantité d'os de part et d'autre de l'implant). Par conséquent, dès la première étape de la chirurgie, le dentiste anticipe l'enfouissement de l'implant.

D'autre part, la variable « enfouissement » est présente lors du passage de chaque foret. Car, si un foret n'est pas descendu jusqu'à la profondeur souhaitée, cela crée une butée dans l'os qui empêchera l'implant de s'insérer jusqu'au fond du puits de forage. Ce qui entraînera un sous-enfouissement de l'implant. Pour éviter ce phénomène, le dentiste vérifie la longueur forcée pour chaque foret utilisé.

La variable « état de l'os » et la variable « potentiel d'ancrage de l'os » sont présentes au même moment. En effet, c'est durant le passage de la fraise boule et du foret pilote que le dentiste va pouvoir estimer l'épaisseur de l'os cortical et ainsi déterminer la typologie de l'os. Car comme le souligne un dentiste, c'est au moment : *« du premier forage, que je vois l'os et que je le ressens »* (dentiste n°4).

4.3.2) Opérationnalisation au cours de la phase de mise en place de l'implant

Trois variables sont particulièrement présentes durant la phase de mise en place de l'implant : la « compatibilité du volume du puits de forage avec l'implant à poser », le « potentiel d'ancrage de l'os », et « l'axe ». Nous détaillons successivement chacune de ces variables.

Les variables « compatibilité du volume du puits de forage – implant à poser » et « potentiel d'ancrage de l'os » sont présentes au moment de l'insertion et du vissage de

l'implant dans l'os. Car c'est à ce moment-là que le dentiste ressent de manière tactile si l'implant épouse le puits de forage réalisé. Cette sensation se traduit par une résistance plus ou moins marquée lors du vissage. De plus, cette sensation est démultipliée lorsque le dentiste visse l'implant avec une clé à cliquet (contrairement au contre-angle motorisé). Enfin, comme l'indique un dentiste, cette étape est véritablement « *l'étape clef* » (dentiste n°8) car, c'est à partir de cette sensation que le dentiste détermine la stabilité primaire de l'implant dans l'os.

La variable axe prend également de l'importance au moment de la mise en place de l'implant. En effet, selon les caractéristiques osseuses, le dentiste peut insérer un implant dans un autre axe que celui imposé par le puits de forage. C'est ce qu'indique un dentiste dans le verbatim suivant : « *on fore dans un axe et on peut mettre l'implant dans un autre axe. Surtout si l'os est mou donc il faut tout le temps vérifier, tout le temps guider l'implant dans son axe.* » (dentiste n°7). Par conséquent, le dentiste focalise son attention sur l'axe, pour que l'axe de l'implant corresponde à l'axe du puits de forage.

4.3.3) De la tâche prescrite à l'activité : adaptation du protocole implantaire

Nos résultats révèlent aussi la part d'adaptabilité de l'activité des chirurgiens-dentistes par rapport à la tâche prescrite. Par exemple, le protocole implantaire qui précise le type et le nombre de forets à utiliser est spécifique à un implant et défini par les fabricants. La réalisation de ce protocole implantaire par les chirurgiens-dentistes pourrait alors s'apparenter à l'apprentissage d'une procédure entendue ici comme une succession prédéfinie de tâches à réaliser conduisant à la mise en place de l'implant. Certains praticiens soulignent le rôle de la tâche prescrite « *on n'a pas besoin d'être un petit génie pour être un bon dentiste [...]. Mais, il faut avoir un bon sens pratique. [...] L'avantage, c'est qu'on a de très bons outils, de très bons matériaux.* » ; « *Il y a un protocole, on suit le protocole* » (dentiste 4) ; « *le but c'est de pas avoir de difficultés pendant l'intervention. On se casse la tête à tout préparer avant* » (dentiste n°10).

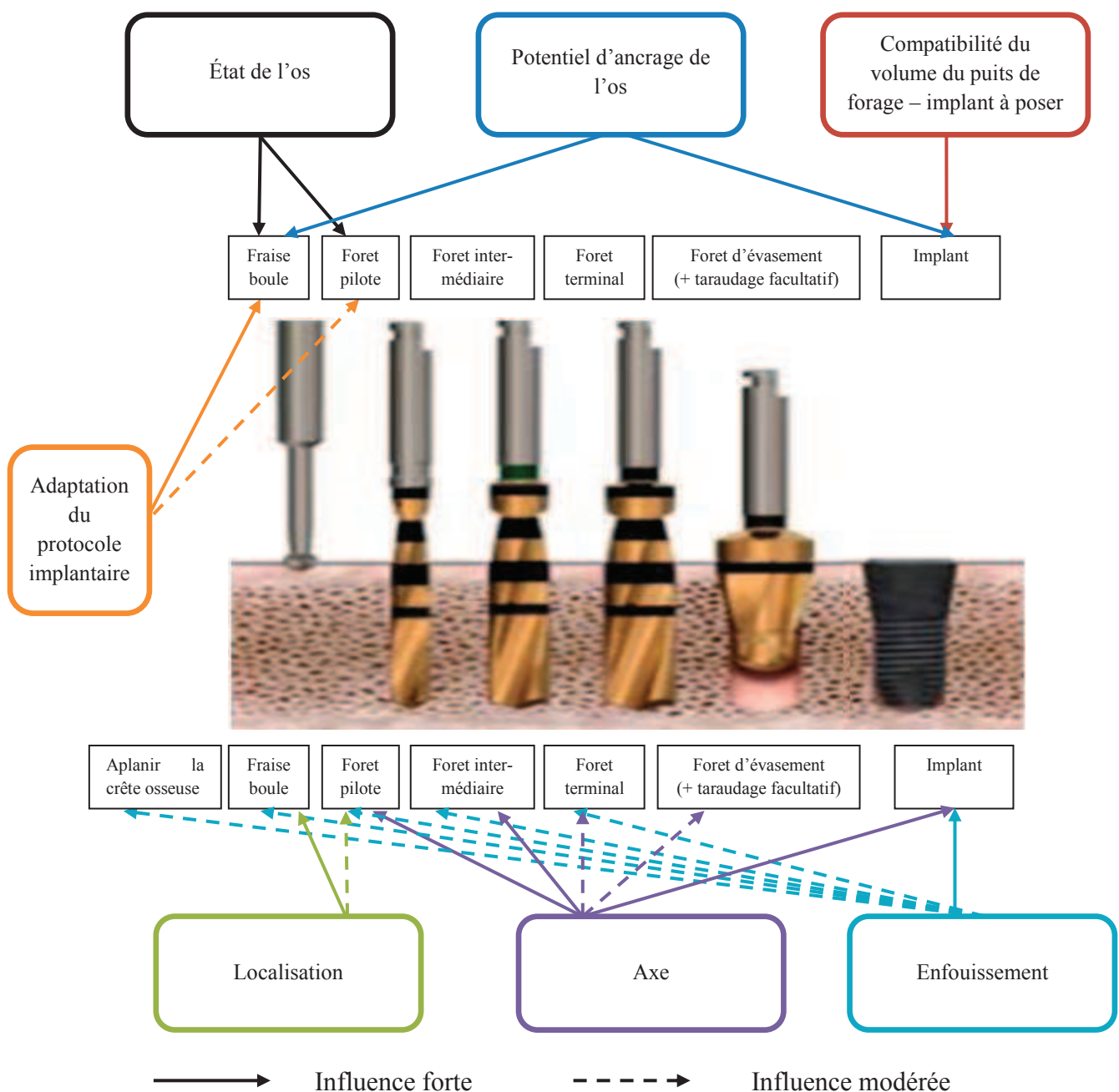
Pour autant, les fabricants sont nombreux à indiquer la nécessité d'adapter le protocole implantaire au type d'os rencontré. Ils distinguent deux cas principaux : le cas où l'os du patient est de faible densité et le cas où il est de forte densité. Comparativement au protocole implantaire recommandé pour les os de faible densité, le protocole implantaire défini pour les os de forte densité comporte un ou plusieurs forets supplémentaires (foret d'évasement, foret de taraudage, etc.) ou le remplacement d'un foret dans le protocole par un autre (foret terminal de diamètre plus important, foret d'évasement de forme différente par exemple).

La détermination de la densité de l'os se révèle donc comme un indicateur important dans le choix du protocole implantaire. Comme le souligne un praticien dans notre étude « *en fonction toujours de cette densité osseuse, on va forer ou jusqu'à la longueur ou un peu moins que la longueur* » (dentiste n°3). Cependant, la typologie osseuse qui comporte quatre classes d'os et non deux comme indiqué par les fabricants est déterminée par le praticien lors de l'intervention chirurgicale en se basant sur ses sensations tactiles lors du perçage de l'os. Ainsi, l'efficacité du praticien repose sur sa capacité à adapter le protocole implantaire au cas

rencontré. Il devra pour ce faire, articuler les sensations fines perçues sur la densité de l'os lors du premier forage (en quatre classes) avec les recommandations de densité osseuse du fabricant définies en deux classes (faible ou forte). Cette capacité à « ressentir » la densité de l'os pour adapter le protocole implantaire ne peut être acquise qu'au cours de mises en pratique réelles.

Au final, nos résultats révèlent la manière dont les chirurgiens-dentistes adaptent les protocoles implantaires au cours des interventions. La Figure 4-18 superpose la tâche prescrite aux variables de la structure conceptuelle mobilisées par les chirurgiens-dentistes au cours de l'activité.

Figure 4-18 : Illustration de l'adaptation de la tâche prescrite lors de l'activité



5) Discussion

Nous avons explicité la tâche d'implantologie dentaire et dégagé deux concepts organisateurs de l'activité des chirurgiens-dentistes reliés à un ensemble de variables et d'indicateurs définissant la structure conceptuelle de la situation en implantologie dentaire. Les résultats de notre étude ont aussi révélé la manière dont les chirurgiens-dentistes mobilisent les différents composants de la structure conceptuelle dans les différentes phases de l'intervention. Ces résultats invitent à discuter d'une part l'activité des chirurgiens-dentistes dans son rapport à la tâche prescrite et d'autre part, à situer cette activité dans un ensemble plus large, étudié en didactique professionnelle, des activités d'acteurs engagés dans la gestion d'environnements complexes liés aux vivants.

5.1) L'activité des chirurgiens-dentistes en implantologie

Notre structure conceptuelle de la situation fait état d'un système complexe. En effet, une variable peut être définie par plusieurs indicateurs, un indicateur peut avoir des origines différentes (métriques ou perceptives) et, un même indicateur peut renseigner à la fois une variable du concept « d'émergence » et une du concept « d'ancrage ». Par conséquent, dans cette multitude d'indicateurs, le dentiste expert doit faire des choix. Ces choix sont établis principalement durant la phase de planification de la chirurgie. L'intervention pourrait alors se résumer à la mise en œuvre de cette planification. Notre étude montre qu'il n'en est rien.

Les travaux de Leplat (1985, 2000) ont montré qu'il y avait toujours plus dans le travail réel que dans la tâche prescrite. Il existe dans le travail une part irréductible de création c'est-à-dire d'adaptation aux événements. Le travail ne se réduit jamais à ce qu'on peut en planifier. Nous développons ainsi, outre l'adaptation du protocole implantaire en fonction de la densité osseuse perçue pendant le forage que nous avons déjà mentionné, trois aspects de l'activité des chirurgiens-dentistes attestant leur adaptabilité au contexte spécifique de l'intervention.

Premièrement, l'objectif de la phase de planification est de définir le concept « d'émergence » tout en optimisant l'ancrage. Deux techniques sont principalement utilisées pour parvenir à cet objectif. La première est dite « traditionnelle » et consiste à positionner un calque de l'implant (feuille transparente) sur la planche de scanner afin de déterminer par transparence les caractéristiques et l'émergence de l'implant en fonction des spécificités anatomiques du patient. La deuxième technique consiste à utiliser des logiciels informatiques qui reconstruisent la mâchoire du patient en trois dimensions (3D) à partir d'une image scannée en deux dimensions (2D). Les praticiens utilisent cette reconstruction pour positionner virtuellement un implant dans la bouche du patient et déterminer ainsi ses caractéristiques et son émergence idéale.

Les dix dentistes de l'étude ainsi que les formations que nous avons observées utilisent la technique « traditionnelle ». Or, avec cette technique pour passer de la planification à l'intervention chirurgicale, le dentiste a un double travail à réaliser. D'une part, il doit être capable de réaliser une reconstruction mentale de la mâchoire du patient en 3D à partir des

clichés du scanner (en 2D). D'autre part, il doit être en mesure d'utiliser cette reconstruction mentale pour transférer les informations prises sur le scanner dans la bouche du patient, c'est-à-dire pour pouvoir se repérer dans la bouche du patient et se représenter la partie non visible de l'os. Cette double activité développée par les chirurgiens-dentistes lors de l'intervention chirurgicale montre que l'activité ne se limite pas à une application stricte de la planification. Elle ne va pas de soi et doit être apprise.

Deuxièmement, l'intervention consiste pour le dentiste à mettre en œuvre sa planification. Lors de cette intervention, il dispose d'indicateurs métriques sous forme d'une sonde graduée pour donner une valeur aux variables « localisation » et « enfouissement ». Ce n'est pas le cas pour établir une valeur pour la variable « axe ». Cette variable constitue donc pour le praticien un challenge dans sa volonté de transférer le protocole implantaire dans le cadre de l'intervention réelle. La détermination de la valeur de cette variable constitue une adaptabilité du praticien au cours de l'intervention ainsi que la capacité à orienter un foret selon l'axe défini (habileté motrice fine). Cette capacité devra de plus être reproduite à plusieurs reprises au cours de l'intervention dans la mesure où d'une part, l'axe définitif s'établit à partir du passage de plusieurs forets consécutivement et d'autre part, le dentiste doit retrouver un positionnement gestuel fin entre chaque passage de foret. En effet, l'habileté motrice fine sur laquelle repose la capacité à assurer le forage de l'os selon un axe prédéfini doit être reproduite à plusieurs reprises dans le temps de l'intervention en raison des interruptions répétées de l'activité de forage liées notamment au changement de foret. Cette reproduction à l'identique d'un geste fin constitue à proprement parler un challenge pour le chirurgien-dentiste.

Troisièmement, le dentiste doit toujours faire face au cours de l'intervention à de l'imprévu. En effet, dans les situations filmées, nous avons rencontré de multiples imprévus : un foret manquant dans la trousse implantaire, une greffe osseuse pas encore cicatrisée, un implant qui transperce légèrement la paroi osseuse, un diamètre de puits de forage trop important par rapport à l'implant prévu, un guide chirurgical qui ne se positionne pas au bon endroit, etc. Tous ces imprévus sont autant de situations auxquelles le dentiste doit faire face dans l'instant et en présence d'un patient conscient (il n'y a pas d'anesthésie générale, pour l'implantologie).

Prenons l'exemple de l'utilisation des guides chirurgicaux que nous avons présenté précédemment. La prescription de ces guides par les fabricants d'implants repose sur l'idée que l'activité des chirurgiens-dentistes consiste à mettre en œuvre un plan d'intervention préétabli. Notre étude montre qu'il n'en est rien. Par exemple, nous avons observé un dentiste qui avait prévu d'utiliser un guide chirurgical³⁸ pour réaliser l'ensemble de la séquence de forage. Ainsi, le geste du dentiste aurait été contraint et la chirurgie aurait consisté à la mise en œuvre d'une procédure pré-établie. Or dès le début de l'intervention, le dentiste s'est aperçu d'un décalage entre la position prévue du guide chirurgical et sa position réelle dans la bouche du patient. Celui-ci a donc pris la décision de le retirer et de réaliser l'intervention sans l'aide du guide chirurgical. Même si les étapes de l'intervention restent les mêmes avec

³⁸ Exemple d'utilisation de guide chirurgical : http://www.dailymotion.com/video/x258bq_nobel-guide_tech (visité le 21-09-11)

et sans guide chirurgical (planification, consignes de sécurité, forets et vitesse de rotation identiques), cela a entraîné des conséquences dans l'activité du dentiste. En effet, habitué à utiliser des guides chirurgicaux, il a ressenti un sentiment d'inconfort qui l'a poussé à multiplier les points de contrôle. Ainsi pour chaque foret, il a positionné à plusieurs reprises dans le puits de forage une jauge pour vérifier l'angulation du puits de forage et son diamètre, chose qu'il ne fait pas habituellement. Au final, selon ses dires, l'intervention a été significativement plus longue (10 minutes) par rapport à une intervention avec guide chirurgical.

Ainsi, si la phase de planification ressort comme d'une grande importance dans la tâche d'implantologie, elle n'est pas pour autant suffisante. La phase de chirurgie est loin de se résumer à la simple mise en œuvre d'un plan. Au cours de cette phase, le praticien est amené à s'adapter à des conditions nouvelles ou changeantes.

5.2) De l'activité des chirurgiens-dentistes en implantologie aux activités d'acteurs engagés dans la gestion d'environnements liés aux vivants

La tâche d'implantologie réfère aux activités de gestion d'environnements complexes liés au vivant. Comme nous l'avons développé dans le chapitre précédent, des auteurs ont utilisé le cadre de la didactique professionnelle pour analyser l'activité d'acteurs engagés dans ce type d'environnements. Il s'agit des études de Caens-Martin (1999, 2004) sur l'analyse de l'activité lors de la taille de la vigne et celles de Vadcard (2005, 2009) analysant l'activité de chirurgiens-orthopédiques. Notre étude apporte de nouveaux résultats dans ce domaine et se positionne par rapport à ces travaux.

Dans la tâche étudiée par Caens-Martin consistant à tailler un cep de vigne, l'analyse de l'activité a révélé que les tailleurs mobilisaient dans le processus de taille deux concepts principaux : la charge (visible immédiatement) et l'équilibre (visible sur le long terme). Si ces deux concepts sont identifiés de manière distincte dans la structure conceptuelle de la situation pour des raisons de représentation de l'activité des acteurs, ils opèrent de manière conjointe dans l'activité réelle des tailleurs. Ainsi, dans certaines situations, ils vont de pairs c'est-à-dire que le tailleur opère une coupe permettant à la fois un équilibre du cep et une charge optimale. Dans certaines situations cependant, les conditions amènent le tailleur à construire un compromis en situation entre la charge déterminant la production de grappes et l'équilibre du cep.

Dans l'activité que nous avons analysée, nous retrouvons cette notion de compromis entre deux concepts organisateurs d'une action. En effet, les chirurgiens-dentistes rencontrent des situations dans lesquelles ils sont en mesure d'obtenir à la fois un ancrage pérenne de l'implant associé à une émergence présentant un alignement entre l'axe de l'implant et l'axe de la future prothèse fixée sur la tête de l'implant. Dans ce cas, les forces de pressions n'affectent pas la stabilité de l'implant dans l'os.

Pour autant, notre analyse de l'activité révèle que les chirurgiens-dentistes rencontrent des situations dans lesquelles ils sont amenés à construire un compromis entre les deux concepts organisateurs de la situation. C'est le cas par exemple, lorsque l'axe de l'implant ne peut être parfaitement aligné avec l'axe de la future prothèse (spécificités des structures anatomiques). Dans ce cas, ils recherchent un résultat acceptable c'est-à-dire que la pérennité de l'implant soit assurée malgré des forces de pressions s'exerçant dans un axe différent de celui de sa pose.

De même, la question du résultat visible immédiatement (la « charge » dans le cas de la taille de la vigne) et du résultat ne pouvant être appréciée qu'après un temps défini (« l'équilibre » dans le cas de la taille de la vigne) se retrouve dans l'activité d'implantologie. En effet, le concept d'émergence est directement observable par le chirurgien-dentiste au cours de l'intervention alors que le concept « d'ancrage » va s'affiner au fil du temps (évaluation de la stabilité primaire puis de l'ostéointégration). Ainsi, ces deux structures conceptuelles de la situation opérant sur des activités du vivant présentent deux similitudes principales : la recherche d'un compromis entre deux concepts organisateurs de l'activité et l'appréciation immédiate et différée du résultat de l'activité.

Dans la tâche étudiée par Vadcard (2005, 2009), consistant à placer un implant pour maintenir un os fracturé en position de reconstruction, l'analyse de l'activité a révélé que les chirurgiens mobilisaient un concept organisateur : l'ancrage. Celui-ci témoigne de la préoccupation des chirurgiens à assurer un maintien de qualité au moment de la chirurgie et sa pérennité.

Notre étude a dégagé ce concept d'ancrage comme l'un des deux concepts organisateurs de l'activité des chirurgiens-dentistes. Par conséquent, confrontés à des activités proches (pose d'un implant dans un os), les acteurs mobilisent un même concept organisateur, l'ancrage. Il s'agit dans les deux cas d'obtenir un maintien de l'implant immédiat (stabilité primaire) et un maintien dans le temps (ostéointégration) pour assurer la pérennité du soin.

Jusqu'à présent, les études en didactique professionnelle se sont attachées à identifier les structures conceptuelles d'un ensemble de situations. Notre résultat peut conduire à l'hypothèse du caractère générique de certains concepts dans certaines activités. Ces concepts communs pourraient refléter une organisation et des préoccupations communes de la part des acteurs engagés dans des activités d'un même domaine. Cette hypothèse constitue une perspective d'avenir. Des études complémentaires dans le domaine de la santé seraient à mener pour définir si le concept d'ancrage peut être commun aux activités chirurgicales nécessitant la pose et la pérennité d'un matériau extérieur dans le corps d'un patient. Or, s'il est possible de généraliser certains concepts organisateurs pour un ensemble de situations ayant des propriétés communes, cela ouvre des pistes de recherche pour de la « méta-analyse d'activité » dans des domaines proches. Cette notion de généralisation et de méta-analyse sont fort intéressantes d'un point de vue informatique car elles permettent de concevoir des plates-formes génériques pour la conception d'EVAH.

6) Conclusion du chapitre

Pour analyser l'activité de chirurgiens-dentistes experts en implantologie, nous nous sommes appuyés sur le cadre théorique de la didactique professionnelle. L'objectif de l'étude était d'identifier les concepts organisateurs de l'activité. Pour ce faire, nous avons procédé en trois temps.

Premièrement, nous avons analysé la tâche d'implantologie grâce à une compilation de données (ouvrages spécialisés, observations de cours théoriques et de travaux pratiques, protocoles opératoires des fabricants). Cette analyse a montré que la tâche fonctionnait en une succession d'étapes. Nous avons donc identifié les étapes à suivre ainsi que les indicateurs significatifs pour les réaliser.

Deuxièmement, nous avons analysé l'activité de dix chirurgiens-dentistes experts en implantologie. Plus précisément, nous avons filmé ces experts en situation réelle de pose implantaire et mené des entretiens d'auto-confrontations. Enfin, nous avons analysé ces entretiens à l'aide des catégories conceptualisantes dont la méthodologie est détaillée par Paillé et Mucchielli (2008).

Troisièmement, nous avons identifié la structure conceptuelle de la situation pour l'implantologie dentaire. De cette analyse, nous retenons l'identification de deux concepts organisateurs, celui d'« émergence » et celui d'« ancrage », qui s'articulent avec un ensemble de variables et d'indicateurs qui vont être plus ou moins mobilisés selon les interventions.

Au final, nous pouvons avancer que l'activité d'implantologie consiste à réaliser un compromis entre le concept « d'émergence » qui permettra de réaliser le projet prothétique et le concept « d'ancrage » qui permettra au projet prothétique de durer dans le temps. Ces deux concepts n'étant pas toujours convergents.

Notre discussion s'est focalisée sur deux aspects. D'une part, nous avons démontré que la phase de chirurgie (activité) n'était pas une simple application de la phase de la planification (tâche prescrite), mais qu'au contraire, elle la dépassait. D'autre part, nous avons confronté notre structure conceptuelle de la situation aux travaux similaires portant sur le vivant. Nous remarquons de fortes similitudes dans leurs structures et dans leur contenu (notion de compromis et de concept d'ancrage). Nous envisageons ainsi d'effectuer des recherches sur la possibilité de généralisation des résultats (notion de méta-structure conceptuelle de la situation dans un domaine d'activité précis).

Enfin, comme l'a montré Pastré (1999a, 2005b) dans son étude sur la conduite de centrale nucléaire, les acteurs ayant un haut niveau d'études disposent d'un modèle cognitif de la tâche à réaliser, mais ont des difficultés à faire des liens de significations entre l'ensemble des concepts, des variables et des indicateurs. Par conséquent dans ce cadre, le but d'un EVAH est de permettre la pragmatisation des concepts théoriques c'est-à-dire de permettre le passage d'un modèle cognitif de la connaissance (concept théorique) à un modèle opératif (concept pragmatique) (Pastré, 1999a, 2005b). Ainsi, en implantologie, la problématique est identique : les chirurgiens-dentistes disposent d'un modèle cognitif mais

pas forcément d'un modèle opératif avant de débiter les chirurgies sur de vrais patients dans le cadre du compagnonnage. Ainsi, l'objectif du chapitre suivant sera d'explicitier la démarche de conception (ergonomie, périphérique, contenu pédagogique) de l'EVAH VirTeaSy sur la base de notre analyse de l'activité et dans le but de permettre à des dentistes novices en implantologie de construire le modèle opératif de la situation.

5e chapitre : De la structure conceptuelle de la situation à la conception de VirTeaSy

1) Introduction

Le chapitre 5 présente le passage de l'analyse de l'activité à la conception d'un Environnement Virtuel pour l'Apprentissage Humain. Il s'agit ici de s'emparer de la structure conceptuelle de la situation dégagée auprès de chirurgiens-dentistes lors d'interventions sur des cas variés pour en faire un outil de référence à la conception d'un EVAH en implantologie dentaire.

L'objectif de l'EVAH VirTeaSy est de permettre aux chirurgiens-dentistes d'apprendre à poser des implants dentaires de manière efficace puis de transférer ces apprentissages à des situations réelles d'interventions. On vise donc l'apprentissage d'une compétence définie en didactique professionnelle comme « *un ensemble organisé de représentations (conceptuelles, sociales et organisationnelles) et d'organiseurs d'activité (schèmes, procédures, raisonnements, prise de décision, coordination) disponible en vue de la réalisation d'un but ou de l'exécution d'une tâche* » (Samurçay et Pastré, 1998, p.121). Être compétent dans le cadre de la didactique professionnelle, c'est donc savoir exécuter, tout en sachant comprendre et analyser. Il s'agit de passer d'une forme prédicative ou énonciative de la connaissance à une forme opératoire permettant de s'adapter aux circonstances autour de la structure conceptuelle de la situation, noyau invariant qui organise l'action efficace.

Par conséquent, notre EVAH devra viser l'apprentissage 1) d'un savoir exécuter, c'est-à-dire des habiletés motrices et perceptivo-cognitives permettant de réaliser le protocole opératoire (réalisation du puits de forage en fonction d'une planification et pose de l'implant dans ce puits de forage) et de le transférer en situation réelle ; 2) d'un savoir comprendre et analyser, c'est-à-dire d'une capacité à adapter le protocole opératoire au cours de l'intervention chirurgicale en fonction des caractéristiques du patient virtuel. Autrement dit, l'EVAH vise l'acquisition par des novices en implantologie de la structure conceptuelle de la situation en implantologie dentaire (mise en relation des concepts organisateurs, des variables et des indicateurs) dégagée auprès de praticiens experts à partir de cas variés.

Pour concevoir un tel EVAH, nous mettons en place une méthodologie de conception qui reprend et articule les travaux de Chen (Chen, Toh et Fauzy, 2004) et ceux de Vidal-Gomel (2005).

Chen propose un cadre théorique pour guider la conception des EVAH. Ce cadre est divisé en deux sous-ensembles. Le premier est appelé « macro-stratégie ». Il renvoie à la conception globale de l'EVAH et implique 1) l'identification des objectifs d'apprentissages

(habiletés, connaissances, etc.) et la relation entre ces objectifs ; 2) l'identification de scénarios pédagogiques permettant à l'apprenant d'acquérir les apprentissages visés ; 3) l'identification des aides à apporter à l'apprenant (informations ressources, outils cognitifs, outils de collaboration, etc.) pour faciliter l'acquisition des apprentissages visés. Le deuxième sous-ensemble est appelé « micro-stratégie ». Il renvoie à l'adaptation des scénarios pédagogiques en fonction du type d'EVAH que l'on souhaite concevoir. Ainsi, dans ce cadre théorique, Chen et al. (2004) identifient quatre principes de réalisation de scénarios pédagogiques : 1) le principe conceptuel qui guide l'apprenant vers les informations qu'il doit considérer ; 2) le principe de la métacognition qui indique à l'apprenant comment penser durant l'apprentissage ; 3) le principe procédural qui indique comment utiliser les informations disponibles dans l'EVAH ; 4) le principe « stratégique » qui permet à l'apprenant d'analyser la tâche d'apprentissage ou le problème à résoudre.

Vidal-Gomez propose d'utiliser les dimensions de la structure conceptuelle de la situation pour concevoir un EVAH. Elle identifie trois niveaux : le simulateur, la situation simulée, et la situation de simulation. Le premier niveau est le simulateur. Il renvoie aux artefacts physiques qui simulent partiellement ou totalement le fonctionnement d'un système. Il est constitué d'un modèle du système simulé, d'un modèle de l'environnement extérieur, d'une interface apprenant et parfois, d'une interface spécifique pour le formateur. Le deuxième niveau est la situation simulée et constitue pour le formateur « *à la fois un plan d'action à mettre en œuvre et un système d'attente qui va orienter la gestion de la situation* » Vidal-Gomez (2005, p.161). Ce niveau est un ensemble qui englobe le simulateur, la situation de référence avec un ou plusieurs scénarios, ainsi qu'un dispositif opérationnel (organisation en termes de place et de fonction pour le traitement de la situation) et les choix didactiques du formateur en fonction de ses objectifs. Enfin, le troisième niveau qui englobe les deux précédents est la situation de simulation. Ce niveau renvoie à la « *mise en scène particulière d'une situation simulée qui va évoluer avec sa propre dynamique c'est-à-dire en fonction de l'activité de l'apprenant et des interventions du formateur* » Vidal-Gomez (2005, p.161). Notons que les interventions du formateur peuvent être orientées par les traces de l'activité de l'apprenant enregistrées dans le simulateur. Finalement dans cette proposition méthodologique, le rapport entre situation simulée et situation de simulation peut être comparé à la différence identifiée entre la tâche et l'activité.

La méthodologie proposée par Chen est orientée par des préoccupations informatiques et pédagogiques. Elle apporte une base solide pour identifier les différents éléments à prendre en compte pour concevoir un EVAH (type d'apprentissage visé, scénarisation pédagogique, système d'aides, pédagogie à implémenter). Pour autant, cette méthodologie est insuffisante en l'état pour servir de guide à notre travail de conception dans la mesure où elle ne prend pas en compte l'usage de l'EVAH par l'apprenant et le formateur. La méthodologie proposée par Vidal-Gomez nous permet de réinvestir le travail d'analyse de l'activité des chirurgiens-dentistes dans la conception de l'EVAH. Elle est cependant peu dirigée par les contraintes informatiques qui pèsent toujours dans le développement d'un EVAH. Aucune de ces deux approches n'intègre la question de l'insertion de l'EVAH dans un dispositif complet de formation. De plus, elles ne considèrent pas non plus la nécessaire hiérarchisation des tâches

situations proposées à l'apprenant lui permettant de choisir une situation adaptée à son niveau. Aussi, nous avons fait le choix de combiner ces deux approches méthodologiques et d'ajouter deux étapes complémentaires afin de proposer une méthodologie de conception de notre EVAH en 5 étapes :

- 1) Définition du type d'EVAH et de ses caractéristiques « hardware »
- 2) Définition de l'environnement virtuel et des situations d'apprentissage
- 3) Définition de l'enrichissement de la situation d'apprentissage grâce à la réalité virtuelle
- 4) Définition de la gestion de la complexité dans l'EVAH
- 5) Définition de l'intégration de l'EVAH à un dispositif global de formation

2) Définition du type d'EVAH et de ses caractéristiques « Hardware »

Dans le chapitre 2, nous avons distingué différents types de pédagogies et leurs conséquences sur la conception de l'EVAH en termes de niveau de réalisme. Notons que pour nous, les dimensions du réalisme ne se limitent pas seulement à la reproduction en infographie des objets 3D de l'environnement mais intègrent aussi les sensations tactiles ressenties par le praticien au cours de l'intervention. Ces sensations sont réalistes si le chirurgien-dentiste retrouve dans l'EVAH ce qu'il ressent tactilement en situation réelle d'intervention.

Pour sélectionner le niveau de réalisme de notre EVAH VirTeaSy, nous nous sommes appuyés sur des travaux scientifiques (Schnierder, 1985 ; Alessi, 1988 ; Johnson et al., 2000) montrant que 1) plus les EVAH étaient réalistes, plus le transfert des apprentissages du virtuel au réel était facilité ; 2) moins les EVAH étaient réalistes plus l'apprentissage initial pour les novices était facilité. Par conséquent, les auteurs cités précédemment recommandent d'utiliser un faible niveau de réalisme pour des novices et de l'augmenter à mesure que les utilisateurs progressent dans leurs apprentissages. Nous avons intégré ces recommandations de deux manières.

D'une part, le transfert constitue une préoccupation importante dans la conception de VirTeaSy dans la mesure où la finalité est que les chirurgiens-dentistes soient en mesure de transférer ce qu'ils ont appris de l'EVAH à des situations d'intervention réelle. D'autre part, VirTeaSy s'adresse à des chirurgiens-dentistes experts. Ceux-ci maîtrisent en cabinet les techniques dentaires classiques. Il s'agit donc de leur apprendre les techniques spécifiques à l'implantologie afin qu'ils puissent les mobiliser dans leur future pratique implantaire.

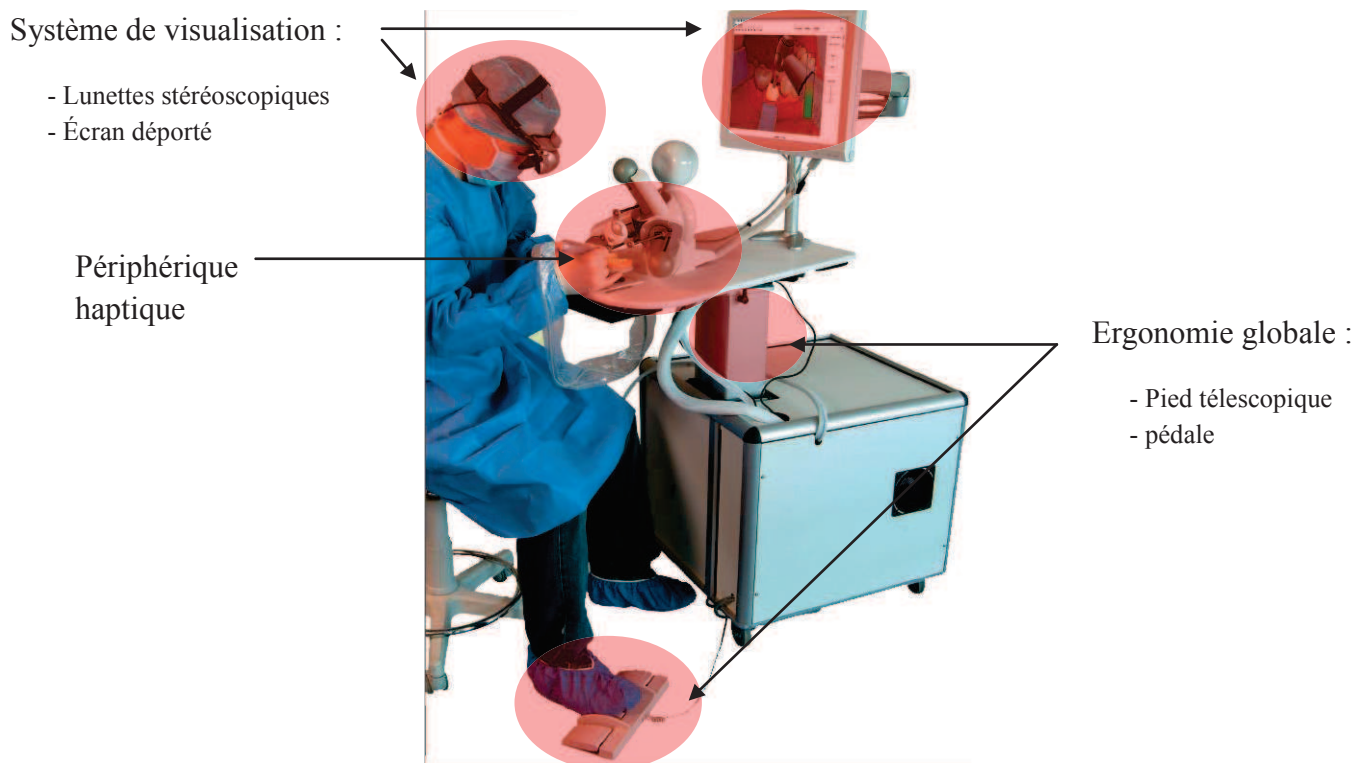
Nous avons donc opté pour un EVAH de type pleine échelle, c'est-à-dire dans lequel les individus retrouvent l'ensemble des objets de leur situation d'intervention réelle, et avec un haut niveau de réalisme. Ce choix conduit à adopter certaines caractéristiques « Hardware ».

Ces caractéristiques ont été définies à partir de deux sources d'information. D'une part, les informations présentées dans la revue de littérature sur les EVAH dentaires à

« interaction haptique » ont montré l'importance de mettre en place une colocalisation entre la vision et l'haptique, une ergonomie globale proche de la situation de travail et un suivi de l'apprenant en temps réel pour le formateur. D'autre part, les résultats de l'analyse de l'activité ont montré l'importance des sensations tactiles et le besoin de visualiser précisément des angulations.

Par conséquent, comme l'indique la Figure 5-1, VirTeaSy devra permettre : 1) de visualiser l'environnement virtuel à l'aide d'un système de visualisation ; 2) de procurer des sensations tactiles à l'aide d'un périphérique haptique ; 3) de disposer d'une ergonomie globale se rapprochant le plus possible de la position de travail du dentiste. Nous détaillons chacun de ces points.

Figure 5-1 : Illustration de l'EVAH VirTeaSy



2.1) Un système de visualisation pour apprendre des habiletés perceptivo-cognitives

Pour acquérir les habiletés perceptivo-cognitives nécessaires à la pose d'implant dentaire, VirTeaSy doit disposer d'un système de visualisation. L'analyse de l'activité a révélé en outre que les chirurgiens-dentistes au cours des interventions en implantologie devaient être en mesure de se repérer aisément dans la bouche du patient, d'évaluer précisément des angulations sans disposer d'instruments de mesures spécifiques ou encore, de disposer de différents points de vue sur le site implantaire. Ces indications sur l'activité des chirurgiens-dentistes experts en implantologie ont orienté les caractéristiques « Hardware » de

VirTeaSy par l'adoption d'un système de visualisation composé de trois sous-ensembles. La Figure 5-2 ci-dessous présente ce système.

Figure 5-2 : Illustration du système de visualisation



Le système de visualisation comporte des lunettes stéréoscopiques munies de deux écrans opaques permettant une vue en 3 dimensions (Z800 3D Visor de la société Emagin³⁹). L'apprenant dispose ainsi d'un rendu graphique stéréoscopique lui permettant d'estimer précisément les profondeurs et facilitant le repérage dans l'environnement virtuel et l'évaluation des angulations.

De manière à favoriser une navigation intuitive et de permettre à l'utilisateur d'adopter différents points de vue au cours de la chirurgie implantaire, la vision de l'environnement virtuel est couplée aux mouvements de tête de l'utilisateur. C'est-à-dire que lorsque l'utilisateur déplace la tête, l'environnement virtuel défile dans le sens dans ce déplacement. D'un point de vue technique, cela est obtenu en reliant les lunettes stéréoscopiques à un système de « tracking » à six degrés de liberté (système PatriotTM de la société Polhemus⁴⁰). En outre ce système permet d'obtenir une colocalisation entre la visualisation de l'environnement virtuel et l'interaction haptique.

De plus, VirTeaSy étant destiné à la formation, il est nécessaire que le formateur dispose d'un point de vue sur l'activité de chaque apprenant en cours de chirurgie. Pour permettre cela, le système de visualisation intègre un écran tactile déporté affichant en deux dimensions ce que l'apprenant visualise dans l'environnement virtuel.

Enfin, pour obtenir un ensemble fluide et sans saccade, la fréquence de la mise à jour de l'affichage est de 60 Hz, soit deux fois la valeur recommandée par Liu et al. (2003) dans leur étude sur les EVAH chirurgicaux.

³⁹ <http://www.3dvisor.com/>

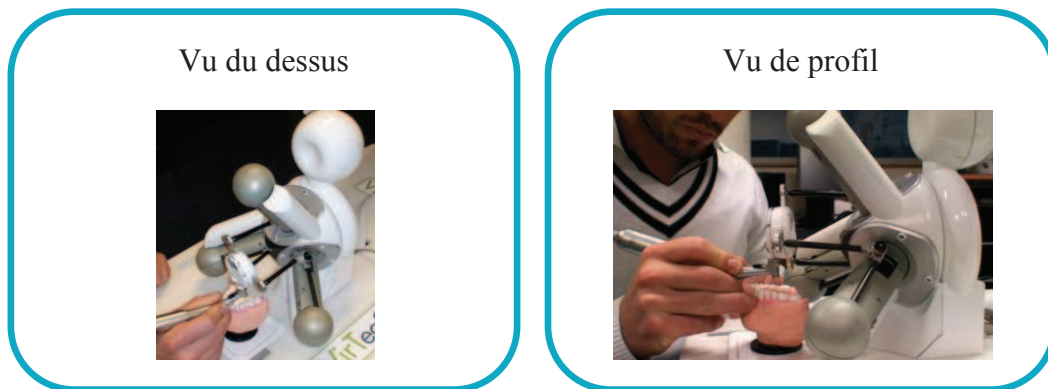
⁴⁰ http://www.polhemus.com/?page=Motion_Patriot

2.2) Un périphérique haptique pour apprendre une habileté motrice

Dans le but d'acquérir l'habileté motrice nécessaire pour réaliser le protocole implantaire, l'interaction entre l'apprenant et l'environnement virtuel se réalise, dans VirTeaSy, à l'aide d'un périphérique haptique. L'analyse de l'activité a révélé que les sensations tactiles du chirurgien-dentiste constituaient un indicateur déterminant pour la réalisation efficace de son action. Cela nous a orienté à faire un choix de périphérique haptique de type haut de gamme intégrant 6 degrés de liberté et une raideur optimale, c'est-à-dire la capacité de l'instrument à reproduire la dureté des objets de l'environnement. Cette nécessité à disposer d'outils reproduisant les sensations du réel est confirmée dans le domaine chirurgical par Chase (1997).

La Figure 5-3 ci-dessous présente le périphérique haptique utilisé dans VirTeaSy.

Figure 5-3 : Illustration du périphérique



Il s'agit du Virtuose™ 6D Desktop⁴¹ de la société Haption. Il est composé de trois branches articulées motorisées procurant un retour d'effort sur les axes de translations et de rotations. Cette caractéristique permet à l'utilisateur d'agir sur les six degrés de liberté. Sa structure autorise l'évolution dans un volume sphérique de dix centimètres. Pour augmenter le niveau de réalisme, nous avons fixé un véritable contre-angle utilisé par les dentistes sur l'extrémité du périphérique haptique. Cette modification a été réalisée en conservant l'échelle 1 pour les mouvements réalisés, c'est-à-dire qu'une translation d'un centimètre dans le réel se traduit par une translation identique dans le virtuel. La fréquence de mise à jour du périphérique haptique est de 1000 Hz. Cette valeur est celle recommandée par Liu et al. (2003).

Le dispositif est complété d'une mâchoire fictive apparaissant sur la figure 5-3 ci-dessus. Cette mâchoire permet aux praticiens de retrouver les points d'appui qu'ils utilisent quotidiennement.

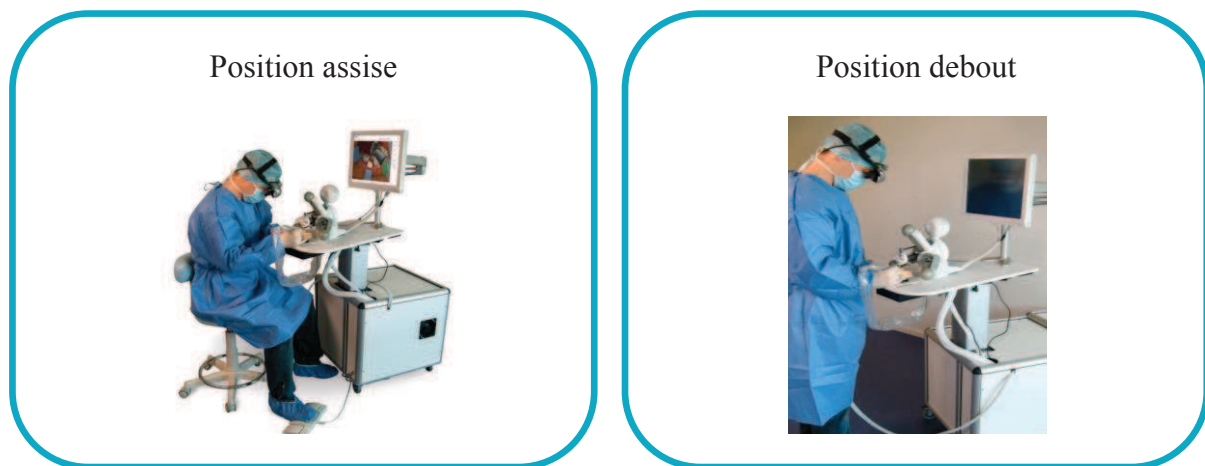
⁴¹ <http://www.haption.com/site/fr/html/materiel.php>

2.3) Une ergonomie globale proche de la situation de travail

L'observation de chirurgiens-dentistes durant des interventions a révélé leur capacité à réaliser un geste fin et à le reproduire de manière successive durant la phase de forage malgré les interruptions liées au changement de foret. Pour conserver cette régularité dans la reproduction d'un geste fin, les praticiens adoptent une position de travail et tentent de la conserver tout au long de l'intervention. Cette position varie en fonction du secteur dentaire dans lequel se réalise l'intervention.

Dans la conception de VirTeaSy, nous nous sommes attachés à conserver les caractéristiques générales de cette position de travail. VirTeaSy est ainsi équipé d'un pied télescopique permettant d'élever, d'abaisser ou de tourner la tablette de travail sur laquelle se trouve le bras à retour d'effort. Ceci permet aux dentistes d'adapter leur position de travail sur VirTeaSy en fonction de leurs habitudes (travail en position assise ou en position debout). La Figure 5-4 illustre deux positions que l'on peut adopter lors de l'apprentissage avec VirTeaSy.

Figure 5-4 : Illustration du pied télescopique



VirTeaSy est aussi équipé d'une pédale activant la rotation du foret comme cela est le cas dans la réalité.

3) Définition de l'environnement virtuel et des situations d'apprentissage

Dans cette partie, nous verrons comment nous avons défini l'environnement virtuel c'est-à-dire, les objets 3D de la scène et leurs interactions ; et les situations d'apprentissage c'est-à-dire, l'utilisation de l'environnement virtuel à des fins de formation.

3.1) L'environnement virtuel

Construire l'environnement virtuel conduit à identifier les objets 3D qui le constituent et leurs interactions. Ces objets 3D se traduisent par exemple, par un outil dentaire, une dent, une langue, le corps du patient, un fauteuil, une fenêtre, etc. et leurs interactions par l'action qu'un outil dentaire peut avoir sur une dent, un os, une langue, etc.

Et même si nous avons décidé de réaliser un EVAH pleine échelle, c'est-à-dire de simuler l'intégralité des objets 3D représentant les éléments de la situation professionnelle de travail et leurs interactions, nous avons dû réduire le périmètre et faire des choix pour deux raisons principales.

D'une part, l'interaction des objets au moyen d'un périphérique haptique nécessite une grande puissance de calcul informatique. Puissance qui est dépendante du nombre d'ordinateurs mobilisés pour effectuer ces opérations. Or, afin de disposer d'un EVAH permettant une viabilité économique, le nombre d'ordinateur n'est pas extensible. Dans ce cas, les concepteurs, pour maintenir une performance optimale du périphérique lors des moments-clefs pour la formation, sont amenés à faire des choix sur les situations d'interaction entre les individus et les objets de l'environnement virtuel. Pour la conception de VirTeaSy, l'analyse de l'activité a constitué une ressource indéniable pour effectuer ces choix.

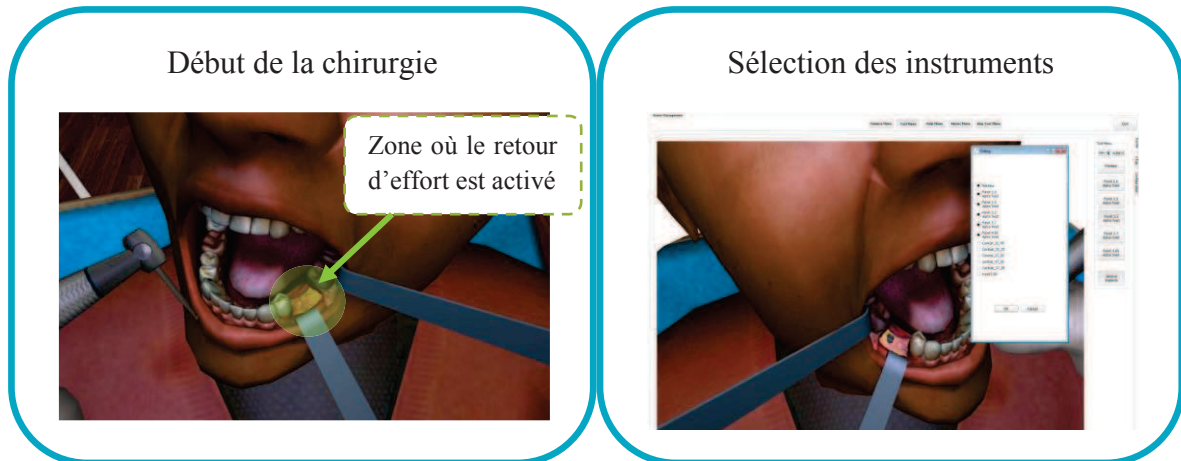
Ainsi, le retour d'effort lors de l'interaction a été limité à l'os à forer et aux dents adjacentes qui sont ressortis de l'analyse de l'activité comme des éléments déterminants pour la construction du concept d'émergence. Il n'y a donc pas de ressenti haptique lors d'une interaction entre l'outil dentaire et la langue du patient, par exemple.

D'autre part, l'étendue de la situation professionnelle de travail, c'est-à-dire l'ensemble des étapes à réaliser pour mener à bien la pose d'un implant dentaire, a dû être réduite. En effet, chaque étape nécessite des développements informatiques (modélisation et infographie d'objets 3D) qui entraînent des coûts importants. Toujours dans l'optique de disposer d'un EVAH économiquement viable, nous avons dû faire des choix qui ont conduit à développer uniquement les étapes entraînant des apprentissages spécifiquement liés à l'implantologie. Par conséquent, toutes les étapes réalisées dans le cadre de l'implantologie mais également dans le cadre d'une activité dentaire classique n'ont pas été développées. Et cette distinction entre le type d'étape a été réalisée à partir de l'analyse de l'activité. Notons tout de même que cette technique consistant à limiter l'étendue de la situation professionnelle de travail à la partie spécifiquement dédiée à l'acquisition des compétences est employée dans de nombreux EVAH comme par exemple l'EVAH haptique Voxel Man Dental (Von Sternbert et al., 2007).

Ainsi, l'analyse de l'activité ayant montré que la compétence en implantologie se situe au niveau des phases de forage et de mise en place de l'implant (Figure 5-5), VirTeaSy simule uniquement ces étapes et les outils nécessaires pour les réaliser (Figure 5-5). Par conséquent, les phases initiales telles que l'anesthésie, l'incision et le décollement de la gencive ; l'utilisation d'outils très spécifiques tels que l'ostéotome ; et les phases finales telle que le nettoyage de la zone implantaire, les sutures, et la fixation de la vis de cicatrisation

n'ont pas été développées dans VirTeaSy. Ces étapes ne nécessitent pas des apprentissages spécifiques pour des dentistes qui exercent déjà en cabinet dentaire.

Figure 5-5 : Illustration de l'environnement virtuel et de l'interface pour sélectionner les instruments dentaires



3.2) Situations d'apprentissage : démarche de conception et présentation de la première situation d'apprentissage

Une fois, l'environnement virtuel défini et réalisé, il faut pouvoir l'utiliser pour construire des situations d'apprentissage qui intègrent les concepts pragmatiques de l'activité des chirurgiens-dentistes, et ainsi passer d'un environnement virtuel à un EVAH.

Deux possibilités se présentaient à nous pour concevoir les situations d'apprentissage. La première consistait à partir de la structure conceptuelle de la situation identifiée auprès des chirurgiens-dentistes experts. La seconde consistait à implémenter dans VirTeaSy une variété de cas réels à partir desquels les apprenants construiraient les concepts pragmatiques de la situation en relation avec leurs variables et indicateurs. Chacune de ces deux solutions comportaient des avantages et des inconvénients. Nous les développons ci-dessous avant de présenter le choix opéré.

Pour mettre en œuvre la première solution, nous devions développer un éditeur d'exercice, c'est-à-dire une interface graphique utilisable par les formateurs dans le but de définir l'ensemble des dimensions d'un exercice. Celui-ci devra alors permettre, d'une part de moduler l'environnement virtuel en fonction des éléments de la structure conceptuelle de la situation, comme par exemple la densité, la forme et l'épaisseur de l'os, la localisation du site implantaire et les structures anatomiques adjacentes ; et d'autre part de définir les fonctions, les aides, et les instruments dentaires disponibles pour l'exercice. Cette solution présente un double avantage. D'une part, elle permet de disposer d'un environnement virtuel paramétrable à « l'infini » par des formateurs ou didacticiens sans l'intervention d'un informaticien. Et d'autre part, elle permet de créer des situations d'apprentissage qui portent très précisément

sur le point ou les points de la structure conceptuelle de la situation à apprendre et ce, en fonction du niveau de l'apprenant et des objectifs pédagogiques fixés. Cependant cette grande liberté présente deux inconvénients, l'un informatique et l'autre pédagogique. D'un point de vue informatique, la réalisation d'un tel éditeur d'exercice représente un développement extrêmement long et coûteux pour obtenir le niveau de genericité nécessaire. D'un point de vue pédagogique, ce type de fonctionnement n'est pas en adéquation avec la pédagogie utilisée actuellement dans les universités françaises qui préfèrent étudier une multitude de cas réels pour en abstraire les éléments de la structure conceptuelle de la situation.

Implémenter dans VirTeaSY la pédagogie pratiquée dans les universités françaises implique de disposer d'informations assez précises sur le cas réel pour créer un cas virtuel fidèle au cas réel (solution 2). D'un point de vue informatique, cela nécessite de disposer d'un scanner du patient réel de bonne qualité, c'est-à-dire ne présentant pas d'artefact⁴² proche de la zone implantaire. L'idée sous-jacente de cette solution est de sélectionner des cas réels qui, de par leur réalisation, permettent d'atteindre les objectifs pédagogiques fixés par le formateur. Ainsi, l'apprenant, en étant confronté à des cas réels divers et variés, sera en mesure d'abstraire la structure conceptuelle de la situation. L'avantage de cette solution est, d'une part, de disposer de situations d'apprentissage très proches du réel et d'autre part, de respecter la pédagogie des universités françaises. Cependant, cette solution implique également des inconvénients. En effet, pour chaque objectif pédagogique, il faut trouver des cas réels qui présentent exactement les éléments à identifier dans la structure conceptuelle de la situation. Disposer d'une banque de données de cas réels devient alors une nécessité absolue. De plus, la création des situations d'apprentissage ne peut plus se réaliser directement par le formateur, car les ingénieurs de la société Didhaptic doivent au préalable traiter et implémenter le scanner dans VirTeaSy.

Finalement, c'est un ensemble de raisons qui nous a permis de sélectionner la deuxième solution par rapport à la première. En effet,

- nous souhaitons disposer de situations d'apprentissage les plus réalistes possibles car l'objectif majeur de VirTeaSy est de permettre le transfert d'apprentissage du réel au virtuel or celui-ci est facilité lorsque les situations d'apprentissage sont proches du réel (Alessi, 1988).
- nous souhaitons respecter la pédagogie mise en place dans les universités médicales françaises pour faciliter l'insertion de VirTeaSy dans les curriculums de formation.
- l'idée d'abstraire les éléments de la structure conceptuelle de la situation à partir de situations d'apprentissage diverses et variées est conforme à notre conception de l'apprentissage qui se rapproche du connexionnisme.
- nous avons accès à une banque de données de cas réels grâce à un partenariat avec la faculté dentaire de Brest alors que les ressources humaines en informatique manquaient à la société Didhaptic pour concevoir l'éditeur générique d'exercice.

⁴² Un artefact correspond à la perte importante d'informations sur le scanner due à la présence d'une couronne ou d'un amalgame dans la bouche du patient.

Ainsi, nous avons mis en place une stratégie en cinq étapes pour passer du cas clinique réel au cas clinique virtuel :

1. Nous partons d'un vrai patient, c'est-à-dire que nous recueillons ses examens radiographiques (scanner, radiographie panoramique, radiographie rétro-alvéolaire) son dossier médical, ainsi que l'ensemble des informations et examens disponibles.
2. À partir du scanner du patient⁴³, le docteur en informatique scientifique de la société Didhaptic crée une mâchoire virtuelle. Cette mâchoire dispose exactement des mêmes caractéristiques que la mâchoire réelle du patient. C'est grâce à cette reconstruction que le périphérique haptique peut renvoyer des sensations tactiles réalistes.
3. La mâchoire virtuelle est intégrée dans une tête de patient virtuel qui est elle-même placée dans un environnement de cabinet dentaire. Un gros effort a été réalisé pour obtenir une scène graphique réaliste.
4. Un dentiste expert en implantologie réalise la planification du cas clinique, c'est-à-dire qu'il indique le nombre d'implants à poser, leurs caractéristiques, ainsi que l'émergence pour chaque implant (localisation, axe, enfouissement). Grâce à cet expert métier, nous disposons de la tâche prescrite qui servira à la fois de donnée d'entrée pour l'apprenant et à la fois de critères d'évaluation.
5. Le cas clinique virtuel ainsi que sa planification sont implémentés dans l'EVAH où l'apprenant pourra réaliser une chirurgie virtuelle.

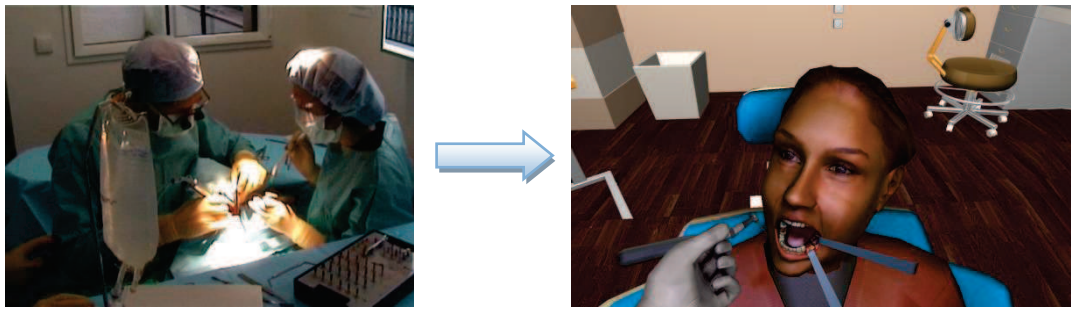
Cette démarche de conception a été mise en œuvre pour concevoir la première situation d'apprentissage à laquelle les apprenants novices sont confrontés. Cette situation correspond dans notre démarche au cas le plus simple de l'implantologie.

La définition « du cas simple » a été réalisée avec la participation d'experts métiers et de professeurs d'université. Ces caractéristiques sont les suivantes : 1) il concerne un édentement unitaire, c'est-à-dire qu'il y a un seul implant à poser ; 2) le secteur implantaire se situe au niveau d'une première molaire ; 3) le site implantaire est encadré par deux dents, ce qui permet de délimiter la zone de travail ; 4) l'angulation de l'implant est parallèle aux dents adjacentes, l'os du patient est parfaitement cicatrisé et présente un large volume osseux ; 5) la crête osseuse est plane ; 6) il n'y a pas de structures anatomiques à éviter (i.e. nerf dentaire ou racine d'une dent adjacente).

Nous avons donc sélectionné un cas réel correspondant à cette définition et recueilli l'ensemble des examens disponibles. Puis à partir du scanner du patient réel, les ingénieurs de Didhaptic ont créé une mâchoire virtuelle et l'ont intégrée à la patiente virtuelle. La Figure 5–6 illustre le passage du cas réel au cas virtuel pour la première situation d'apprentissage.

⁴³ Nous sommes obligés d'avoir le scanner du patient pour reconstruire une mâchoire virtuelle. Tout autre examen ne nous donne pas assez d'information pour le faire.

Figure 5–6 : Illustration de la première situation d'apprentissage



Grâce à cette stratégie, l'ensemble des cas nécessaires à l'abstraction de la structure conceptuelle de la situation ont été implémentés. Nous verrons dans la partie quatre comment la structure conceptuelle de la situation nous a permis de sélectionner ces différents cas. Enfin, bien que notre objectif soit de se rapprocher au maximum de la réalité, nous souhaitons tirer parti des avantages de la réalité virtuelle. Par conséquent, les situations d'apprentissage ont été enrichies par des éléments qui ne sont pas disponibles dans la réalité.

4) L'enrichissement des situations d'apprentissage grâce à la réalité virtuelle

La réalisation des situations d'apprentissage ne suffit pas pour construire la structure conceptuelle de la situation. Par conséquent, pour faciliter la conceptualisation dans l'action, nous nous sommes servis des résultats de l'analyse de l'activité pour enrichir les situations d'apprentissage grâce aux possibilités de la réalité virtuelle. Les apports de la réalité virtuelle sont de trois natures : l'aide, l'évaluation et le jeu.

4.1) Les aides en situation d'apprentissage : identification des éléments de la structure conceptuelle de la situation

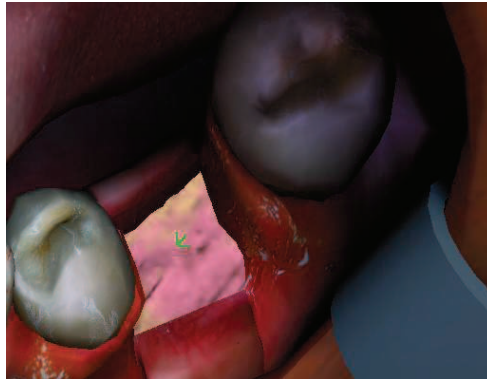
En s'appuyant sur la structure conceptuelle de la situation, nous avons mis au point un système d'aides qui a été implémenté dans l'EVAH. Ces aides ont pour but de faciliter l'identification des concepts organisateurs de l'activité ainsi que leurs variables et indicateurs.

Pour le concept « d'émergence », nos résultats ont montré que le chirurgien-dentiste devait être capable d'apprécier trois variables (localisation, axe, enfouissement). Par conséquent, nous avons mis en place trois aides :

L'aide localisation : cette aide renseigne directement la variable « localisation » en indiquant l'emplacement de l'implant. Concrètement, elle se matérialise par une croix sur la crête osseuse correspondant à l'emplacement déterminé durant la planification (Figure 5–7). C'est donc précisément à cet endroit que doit débiter le forage. Une mise en valeur des

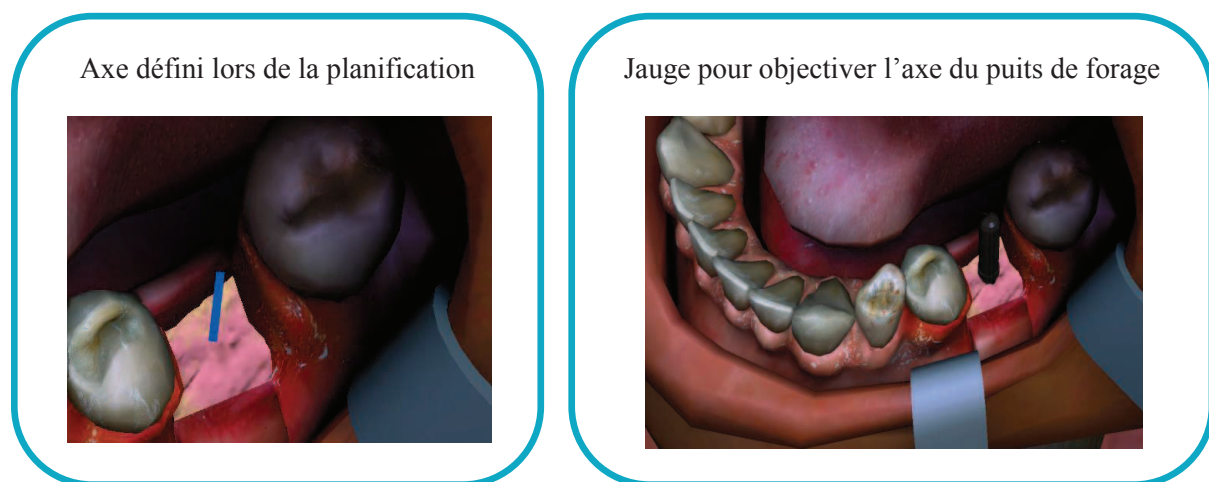
indicateurs de la variable « localisation » est actuellement en cours d'implémentation. Nous cherchons notamment 1) à mettre en surbrillance la distance minimale entre une structure adjacente (bord externe d'une dent ou centre d'un implant) et le centre de l'implant à poser ; 2) à projeter le centre de la dent antagoniste sur la crête osseuse pour aider à anticiper l'occlusion.

Figure 5-7 : Illustration de l'aide « localisation »



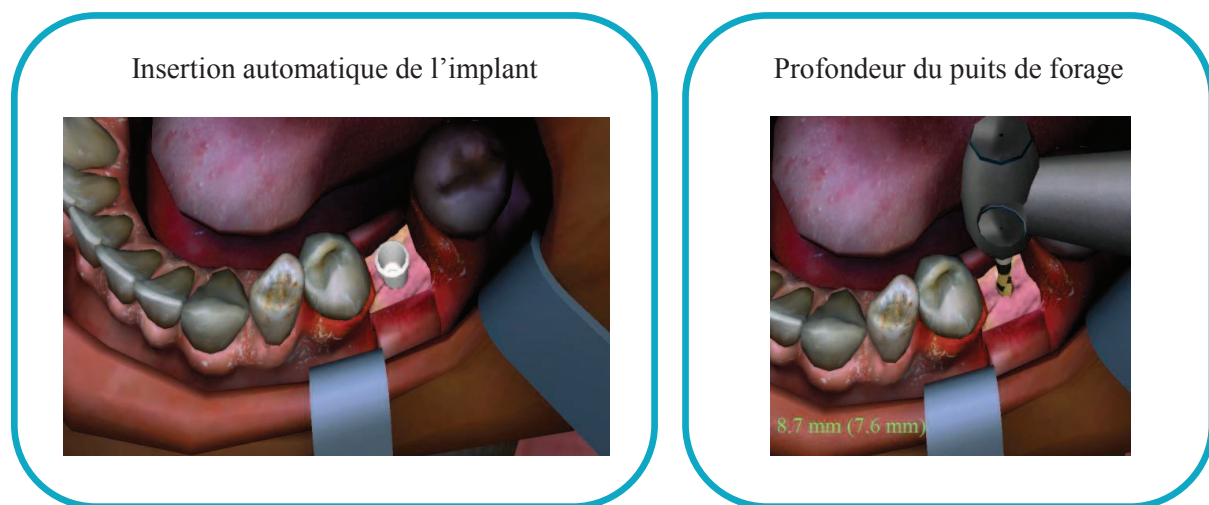
L'aide axe : cette aide renseigne directement la variable « axe » en indiquant l'angulation de l'implant à poser et, par suite, celui du puits de forage. Concrètement, elle se matérialise par un cylindre angulé selon l'axe déterminé pendant la planification (Figure 5-8). De plus, pour objectiver l'axe du puits de forage en cours de réalisation, l'apprenant peut poser une jauge dans le puits de forage (Figure 5-8). Enfin, une mise en valeur des indicateurs de la variable « axe » est également en cours d'implémentation. Nous cherchons notamment à objectiver l'axe des dents adjacentes.

Figure 5-8 : Illustration de l'aide « axe »



L'aide enfouissement : cette aide décrit la variable « enfouissement », en permettant d'insérer, automatiquement et à tout moment de l'intervention, l'implant dans le puits de forage pour visualiser le résultat final (Figure 5–9). De plus, nous avons implémenté une aide sur l'indicateur profondeur du puits de forage. Cette aide indique deux valeurs (Figure 5–9). La première témoigne de la profondeur totale du puits de forage. La deuxième témoigne de la profondeur exploitable pour poser l'implant. La différence entre les valeurs étant la longueur de la pointe du foret (cette longueur est variable d'un fabricant d'implant à un autre et selon que les forets sont à usages uniques ou non).

Figure 5–9 : Illustration de l'aide pour la profondeur et l'enfouissement

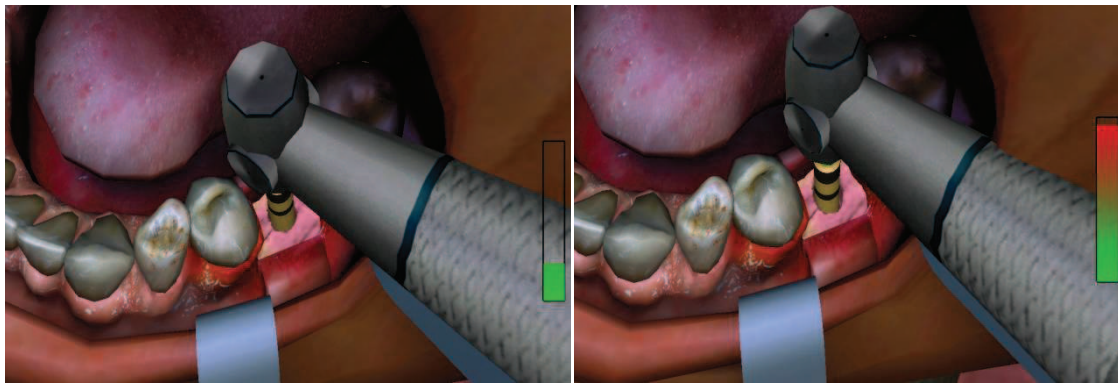


Pour le concept « d'ancrage », nos résultats ont montré que le chirurgien-dentiste devait être capable d'apprécier trois variables (compatibilité entre le volume du puits de forage et l'implant à poser, l'état de l'os, et le potentiel d'ancrage de l'os). Ces variables n'étant pas directement visibles, nous avons implémenté des aides sur les indicateurs des variables.

L'aide ovalisation : cette aide ne renseigne pas directement la variable « compatibilité entre le puits de forage et l'implant à poser » mais décrit un indicateur. Concrètement, elle indique le pourcentage d'ovalisation du puits de forage par rapport au dernier foret utilisé. Plus l'ovalisation est importante moins l'implant pourra se stabiliser dans l'os.

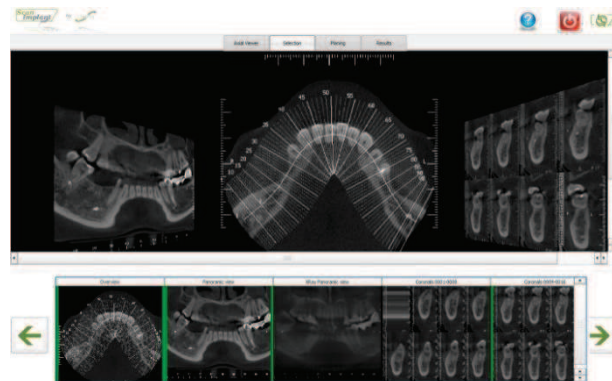
L'aide d'échauffement : Cette aide ne renseigne pas directement la variable « état de l'os » mais décrit un indicateur. Concrètement, comme le montre la Figure 5–10, l'échauffement de l'os est indiqué en temps réel à l'aide d'une jauge qui passe progressivement du vert au rouge (vert : l'échauffement de l'os est normal ; rouge : l'échauffement de l'os est trop important).

Figure 5–10 : Illustration de l'aide pour l'échauffement



La variable « potentiel d'ancrage de l'os » ne dispose pas d'une aide spécifique. Cependant, comme le montre la Figure 5–11, le dentiste peut, à partir de ces connaissances, qualifier cette variable en visionnant les examens radiographiques afin de définir les volumes osseux .

Figure 5–11 : Illustration des examens radiographiques disponibles



Enfin, ces aides peuvent être automatisées grâce aux résultats de l'analyse de la tâche *a posteriori* qui indique à quel moment les variables prennent de l'importance pour le dentiste expert. De ce fait, l'aide localisation est présente lors de l'utilisation de la fraise boule. L'aide axe est présente durant l'utilisation du foret pilote, du premier foret intermédiaire et de l'insertion de l'implant. L'aide profondeur est présente pendant l'ensemble de la chirurgie. Les aides d'ovalisation et d'échauffement sont présentes uniquement pendant l'ensemble de la séquence de forage.

Parallèlement à ces aides, nous avons implémenté la possibilité d'évaluer les actions de l'apprenant.

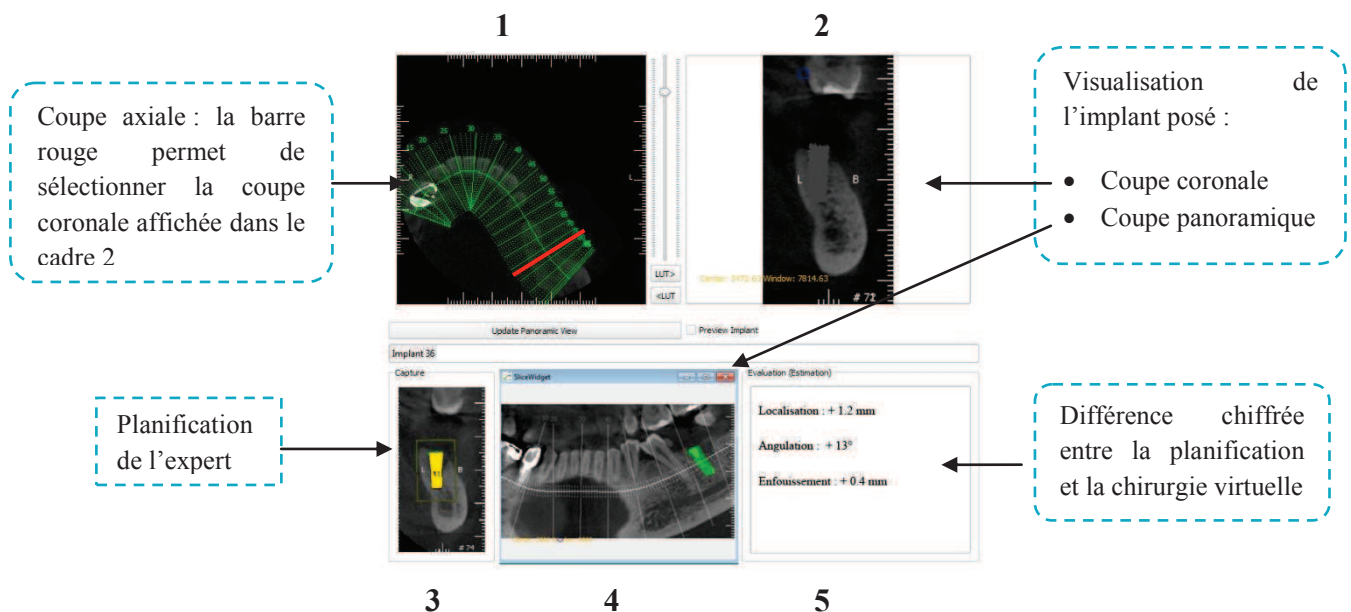
4.2) L'évaluation : objectivation des actions réalisées

Pour évaluer les éléments de la structure conceptuelle de la situation, VirTeaSy dispose de deux modules d'évaluation. L'un est quantitatif et l'autre qualitatif.

VirTeaSy est capable d'évaluer quantitativement les actions de l'apprenant en fonction de la planification réalisée. En effet, pour chaque implant posé, l'étudiant pourra connaître l'écart entre ce qu'il a fait et ce que la planification de l'expert lui a demandé de faire. L'évaluation fournit donc un écart chiffré (en millimètre ou en degré) pour la localisation, l'angulation et l'enfouissement de l'implant (cadre 5 de la Figure 5-12).

VirTeaSy est également capable de fournir un retour qualitatif sur les actions de l'apprenant. En effet, l'apprenant peut voir les effets de ses actions sur le scanner (coupe panoramique et coupes coronales) du patient virtuel. Il peut ainsi juger des différences entre la planification réalisée par l'expert (cadre 3 de la Figure 5-12) et ce qu'il a réalisé dans la chirurgie virtuelle (cadre 2 et 4 de la Figure 5-12). Remarque, cette fonction est disponible à tout moment de l'intervention, ce qui permet à l'apprenant de visualiser sur le scanner le puits de forage qu'il est en train de réaliser.

Figure 5-12 : Illustration de l'interface « évaluation »



Enfin, comme dans le simulateur sur la taille de la vigne, nous sommes actuellement en train de réfléchir à l'implémentation d'une fonction qui permettra d'évaluer l'ancrage de l'implant dans le temps (à 3 mois, 6 mois, 5 ans, 20 ans). Cette fonction permettrait de travailler sur le concept d'ancrage et surtout de faire le lien entre le concept d'ancrage et celui d'émergence. Ainsi, les apprenants pourront objectiver le résultat de leurs actions dans des situations d'apprentissage impliquant la résolution d'un dilemme entre concept d'ancrage et d'émergence.

Grâce aux aides et évaluations, VirTeaSy peut mettre en avant les éléments de la structure conceptuelle de la situation. Cependant pour aider l'apprenant à faire les liens entre les indicateurs, variables et concepts, la meilleure solution est les séances de *débriefing* (Pastré, 1999).

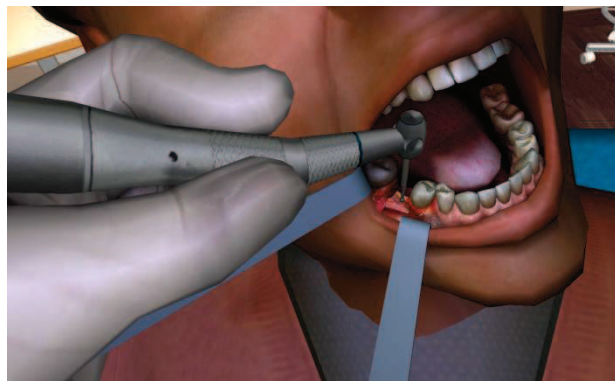
4.3) Le rejeu : lier les éléments de la structure conceptuelle de la situation

Comme l'indique Pastré (1999a), agir dans un EVAH ne conduit pas automatiquement à construire l'articulation nécessaire entre les indicateurs, variables et concepts organisateurs et ce, même en ajoutant les aides mentionnées ci-dessus et la possibilité d'évaluer ces actions. Ainsi, revoir ses actions sous différents points de vue et plus particulièrement avec l'aide extérieure d'un formateur expert peut faciliter la construction de la structure conceptuelle de la situation (Pastré, 1999a).

En effet, lors de ces séances de *débriefing*, le formateur va pour pouvoir détailler les dilemmes à résoudre et mettre en exergue les différents éléments de la structure conceptuelle de la situation. Il pourra également demander à l'apprenant d'explicitier son raisonnement et lui montrer les variables ou indicateurs qu'il aurait fallu prendre en compte pour diagnostiquer la situation dans son ensemble. Enfin, ces moments sont l'occasion de confronter son expérience avec celles des autres apprenants et de débattre des stratégies efficaces à mettre en œuvre pour réussir le cas implantaire.

Par conséquent, nous avons implémenté une fonction de « rejeu ». Cette fonction a pour objectif de servir de support aux séances d'analyse rétrospective de son action. Concrètement comme l'indique la Figure 5–13, elle enregistre la chirurgie virtuelle et permet de la visionner *a posteriori*, soit selon le point de vue de l'apprenant au moment de la chirurgie soit selon le point de vue de son choix.

Figure 5–13 : Illustration de la fonction « rejeu »



Enfin, même avec l'enrichissement des situations d'apprentissage grâce aux aides, aux évaluations et à la fonction de « rejeu », l'apprentissage ne va pas de soi. Un autre moyen de le faciliter est de gérer la difficulté des situations d'apprentissage présentées aux apprenants pour qu'ils restent toujours dans leur zone proximale de développement (Vygostki et Cole, 1978).

5) Gestion de la complexité

Pour adapter le contenu présenté dans VirTeaSy au niveau de chaque apprenant, nous avons mis en place trois dispositifs. Le premier consiste à sélectionner la situation d'apprentissage adéquate. Pour cela nous avons conçu un système de classification des situations d'apprentissage basé sur la structure conceptuelle de la situation. Le deuxième consiste à permettre au formateur d'aider en temps réel (et non *a posteriori* comme c'est le cas avec l'utilisation de la fonction « rejeu ») l'apprenant par l'intermédiaire d'une interface graphique. Enfin, le troisième consiste à présenter des situations d'apprentissage simplifiées. En effet, à la place de présenter des cas cliniques réalistes impliquant toute la complexité du réel, VirTeaSy va présenter des situations d'apprentissage sous forme d'ateliers pour travailler de manière spécifique un apprentissage.

5.1) Sélection et hiérarchisation des cas cliniques

Le Tableau 5–1 reprend les variables de la structure conceptuelle de la situation afin de classer précisément chaque cas clinique à implémenter dans VirTeaSy. Ce tableau considère trois niveaux de difficulté par variable et chaque niveau de difficulté a été défini avec l'aide d'experts métiers et de professeurs d'université.

Tableau 5-1 : Classification des cas cliniques dans VirTeaSy

		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
		Type d'édentement	Édentement partiel	Édentement complet
Général	Secteur impliqué	Secteur molaire	Secteur prémolaire	Secteur antérieur
	Enfouissement	Pas de structure anatomique à proximité du puits de forage Sommet de l'implant au niveau du sommet de la crête osseuse qui est plane	Structure anatomique à proximité du puits de forage mais il existe une marge de sécurité (2 mm) Sur enfouissement de l'implant de 0.5mm par rapport à une crête osseuse plane	Faible marge (inférieure à 2 mm) de sécurité entre une structure anatomique et le puits de forage à réaliser Tous types d'enfouissement mais crête osseuse non plane
Émergence	Axe	L'axe prothétique idéal correspond à l'axe des dents adjacentes et se situe en face des dents antagonistes	L'axe prothétique idéal ne correspond pas à l'axe des dents adjacentes mais se situe en face des dents antagonistes	Pas de repère en bouche. L'axe prothétique idéal n'est pas le même pour les différents implants à poser et ne se situe pas en face des dents antagonistes
	Localisation	La zone de travail est délimitée par des repères anatomiques Il existe une marge supérieure à 2 mm entre l'espace nécessaire pour poser l'implant et l'espace disponible Le centre du puits de forage se situe au centre de la zone implantaire	La zone de travail est partiellement délimitée par des repères anatomiques Il existe une marge inférieure à 2 mm entre l'espace disponible et l'espace nécessaire pour le ou les implants Le centre du puits de forage se situe au centre de la zone implantaire	La zone de travail n'est pas délimitée par des repères anatomiques L'espace disponible correspond exactement à l'espace nécessaire pour le ou les implants Le centre du puits de forage ne se situe pas au centre de la zone implantaire
Ancrage	État de l'os	Site implantaire entièrement cicatrisé	Site implantaire pas totalement cicatrisé ou présence d'une différence de densité osseuse (os natif vs greffe osseuse)	Le site implantaire n'est pas cicatrisé (ex : extraction d'une dent puis pose de l'implant dans les heures suivantes)
	Potentiel d'ancrage	D1	D2 –D3	D4
	Compatibilité volume puits de forage et implant à poser	Volume osseux supérieur au diamètre de l'implant (supérieur à 2 mm d'os tout au tour de l'implant)	Volume osseux légèrement supérieur au diamètre de l'implant (peut être inférieur à 2 mm à certains endroits)	Volume osseux égal ou inférieur au diamètre de l'implant. Des parties de l'implant seront visibles à travers l'os, le dentiste devra réaliser un comblement osseux.

Chaque cas clinique implémenté dans VirTeaSy mobilise l'ensemble des variables et des concepts organisateurs de la structure conceptuelle de la situation d'implantologie dentaire. Cependant, cette mobilisation se fait à des niveaux de complexité différents. Par exemple, le Tableau 5–2 présente le niveau de complexité des variables mobilisé par le premier cas clinique implémenté dans VirTeaSy (celui à présenter aux apprenants novices).

Tableau 5–2 : Classification pour le premier exercice implémenté dans VirTeaSy

		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Général	Type d'édentement	X		
	Secteur impliqué	X		
émergence	Enfouissement	X		
	Axe	X		
	Localisation	X		
Ancrage	État de l'os	X		
	Potentiel d'ancrage	X		
	Compatibilité volume puits de forage et implant à poser	X		

La démarche pédagogique adoptée a donc consisté à hiérarchiser les cas cliniques en les filtrants à partir des niveaux de complexité des éléments de la structure conceptuelle de la situation. Le formateur adapte ainsi le niveau de difficulté de la situation d'apprentissage (cas clinique) au niveau de l'apprenant. Pour mener à bien cette démarche pédagogique, nous implémentons actuellement, avec l'aide de formateurs en implantologie, un panel de cas cliniques représentant l'ensemble des niveaux de difficultés présentés dans le Tableau 5–1.

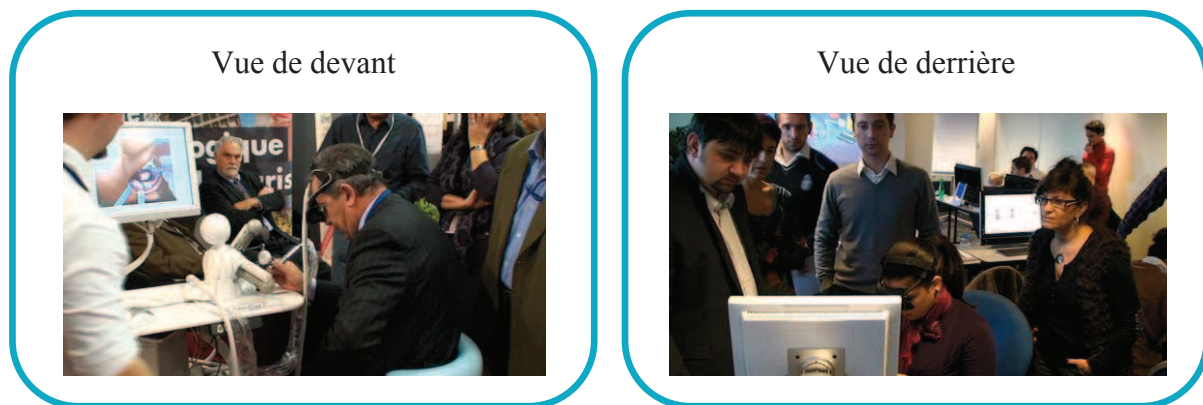
Une fois le cas clinique sélectionné, le formateur accompagne l'activité de l'apprenant en utilisant une interface graphique.

5.2) L'interface formateur

L'interface formateur constitue une aide en cours d'action. Il s'agit d'un guidage par le formateur de l'activité de l'étudiant confronté à une situation d'apprentissage. Ce guidage permet au formateur de mobiliser les variables et les indicateurs de la structure conceptuelle de la situation en fonction de l'activité de l'étudiant dans la situation d'apprentissage afin de l'amener à construire les concepts pragmatiques. Les modalités de ce guidage sont à la discrétion du formateur. VirTeaSy lui fournit un support technique permettant sa mise en œuvre.

En effet, VirTeaSy dispose d'un écran tactile déporté qui sert d'interface temps réel entre le formateur et l'apprenant comme le montre la Figure 5–14. Le formateur peut visualiser les actions de l'apprenant selon les points de vue de son choix. Il peut également zoomer sur la scène, ajuster les aides en fonction des besoins de l'étudiant et apprécier le forage de l'étudiant en consultant le module d'évaluation. Cet écran déporté sert également de support visuel pour les étudiants qui ne manipulent pas l'EVAH. Ainsi, le formateur peut donner des conseils, expliquer les raisons d'une réussite ou d'un échec à un groupe d'étudiant et les faire participer à la situation d'apprentissage. Finalement, cette fonctionnalité permet de favoriser l'apprentissage en faisant évoluer l'étudiant dans sa zone proximale de développement (Vygostki et Cole, 1978), c'est-à-dire dans une situation qui oscille entre ce que l'étudiant sait faire seul et ce qu'il pourrait faire avec l'aide d'une tierce personne.

Figure 5–14 : Illustration de l'interface « formateur » sur un écran déporté



Enfin, grâce à cette interface, le formateur est en mesure d'identifier les difficultés rencontrées par les apprenants lors de la réalisation de cas cliniques. Il peut ainsi indiquer à l'apprenant des ateliers pour travailler de manière spécifique certains apprentissages.

5.3) Les ateliers : des situations d'apprentissage simplifiées

Des ateliers spécifiques sont également proposés aux étudiants rencontrant des difficultés particulières dans la résolution d'un cas clinique. Ces difficultés peuvent être par exemple liées à l'acquisition des habiletés motrices en rapport avec le contexte d'une intervention. Ces ateliers nécessitent de décomposer la situation d'apprentissage dans laquelle se trouve impliqué l'étudiant.

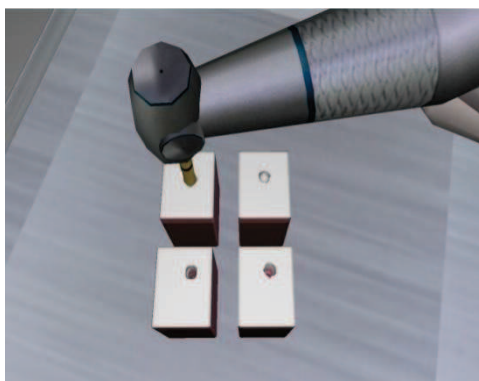
Samurçay (2005) propose de distinguer trois dimensions pour décomposer/recomposer une situation professionnelle dans le but de la rendre progressivement accessible à l'apprentissage. Premièrement, le « découpage » permet d'isoler les sous-tâches spécifiques que le sujet doit maîtriser avant la complexité de la tâche globale. Deuxièmement, le « découplage » consiste à neutraliser totalement ou partiellement les interactions entre les

variables de la structure conceptuelle de la situation. Troisièmement, la « focalisation » renvoie à la centration de l'apprentissage sur une composante particulière de la situation.

Nous avons réinvesti ces trois propositions avec notre analyse de l'activité des chirurgiens-dentistes. Ainsi, pour la dimension « découpage », en nous basant sur l'analyse de la tâche, nous avons créé des ateliers qui reprennent et détaillent de manière isolée chacune des sous-tâches à réaliser pour poser un implant. Ces ateliers correspondent à un mode pas à pas qui permet d'apprendre la procédure à suivre et les critères de réussite associés à chaque sous-étape. Pour la dimension « découplage », nous avons créé un atelier par variable de la structure conceptuelle de la situation. Dans ces ateliers, l'idée est de travailler spécifiquement sur une variable sans prendre en considération les interactions/conséquences de ces actions sur les autres variables. L'apprenant va, par exemple, travailler sur la variable axe en réalisant plusieurs forages avec des angulations imposées, sans se préoccuper de la localisation et de la profondeur du forage. Enfin pour la dimension « focalisation », nous nous sommes appuyés sur les problèmes observés en cours de chirurgie lors de notre étude. Pour ce type d'atelier, l'apprenant est immergé dans une situation où le problème est déjà présent. Par exemple, la situation démarre avec un puits de forage en cours de réalisation et l'apprenant doit augmenter la profondeur du puits de forage.

Pour expliciter nos propos, prenons l'exemple de l'atelier « densité osseuse » qui a mobilisé la dimension « découplage » pour sa création. Cet atelier est destiné à faire acquérir la capacité à identifier le type d'os du patient à l'aide des sensations tactiles perçues lors du forage. Cet apprentissage est primordial car il permet d'adapter le protocole implantaire au cours de la chirurgie. Pour concevoir cet atelier, nous avons déterminé d'un point de vue informatique le ressenti associé aux quatre types d'os (DI, DII, DIII, DIV) et nous les avons implémentés dans quatre plaques virtuelles (Figure 5–15). Dans une première étape, l'EVAH indique la typologie osseuse de chaque plaque virtuelle. Ainsi, l'apprenant, en forant chacune des plaques, va associer un ressenti à une densité osseuse. Puis, dans une seconde étape, l'EVAH n'indique plus la densité osseuse des plaques virtuelles. L'apprenant doit alors identifier la densité osseuse de la plaque qu'il est en train de forer uniquement à l'aide de ses sensations tactiles. À la fin de l'atelier, un module d'évaluation indique si l'apprenant a, ou non, estimé correctement la densité osseuse des plaques virtuelles.

Figure 5–15 : Illustration de l'atelier « densité osseuse »



Sur le même principe, nous avons conçu d'autres ateliers pour travailler par exemple sur 1) la capacité à reproduire un angle de forage à différents endroits en ayant fait une autre tâche entre temps ; 2) la capacité d'aplanir une crête osseuse en tenant compte de la hauteur disponible et de la longueur de l'implant à poser ; 3) la prise de conscience entre la profondeur du puits de forage et la profondeur exploitable du puits de forage.

6) Intégration de l'EVAH à un dispositif de formation

L'implantologie comporte trois phases principales : la phase de planification, la phase de chirurgie et la phase prothétique. Comme nous l'avons signalé précédemment, notre analyse de l'activité s'est concentrée sur la phase de chirurgie. Pour autant, au cours de cette thèse nous avons aussi travaillé sur la phase de planification. L'articulation entre ces deux phases nous permet aujourd'hui de proposer un dispositif plus large de formation à l'implantologie. Si nous ne présentons pas de manière détaillée l'analyse de l'activité durant la phase de planification, nous développons dans cette partie le dispositif de formation dans lequel s'intègre VirTeaSy.

Ce dispositif est composé d'une interaction entre l'EVAH VirTeaSy et le « poste étudiant ». L'idée sous-jacente à l'ajout du poste étudiant est double. Il s'agit d'une part d'étendre le périmètre de formation et d'autre part d'optimiser le temps d'utilisation de l'EVAH VirTeaSy, en distinguant les actions qui nécessitent l'utilisation d'un bras à retour d'effort, des actions pouvant être réalisées sur un ordinateur.

6.1) Le poste étudiant

Le « poste étudiant » est un ordinateur à écran tactile (Figure 5–16).

Figure 5–16 : Illustration du poste étudiant



Ce dispositif bénéficie de multiples fonctionnalités. En effet, il permet à l'apprenant de choisir un cas clinique à traiter parmi une base de cas, d'en réaliser la planification, de comparer cette planification à celle d'un expert, de visualiser les informations relatives à l'évaluation de sa chirurgie virtuelle, de visionner la correction du cas clinique réalisée par un expert et enfin, d'accéder à des cours théoriques et des articles scientifiques en liens avec les cas cliniques disponibles. L'apport principal de ce poste étudiant repose sur le logiciel « Scan Implant » permettant de planifier le cas clinique à réaliser dans l'EVAH.

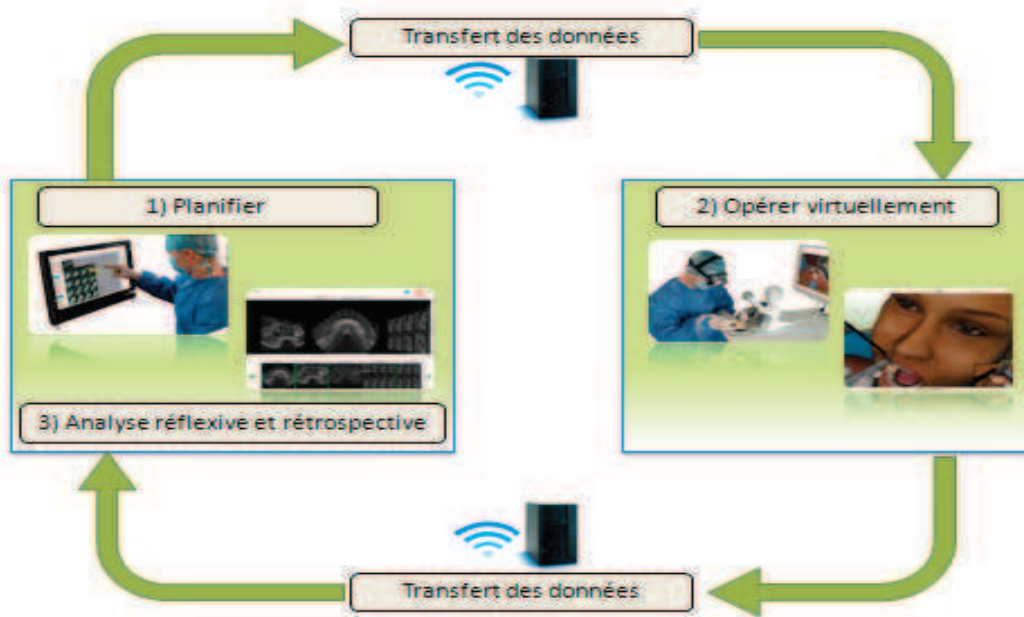
La conception de ce logiciel reprend les attributs observés en formation traditionnelle. Il s'agit de débiter la phase de planification par une sélection des coupes de scanner afin d'y superposer les calques des implants. Cette première phase est suivie du choix d'un implant adéquat respectant les principes théoriques de la planification implantaire. Une fois la planification réalisée, l'étudiant a déterminé les caractéristiques (forme, diamètre, longueur) de l'implant à poser ainsi que son émergence (localisation, angulation, enfouissement). Conformément au choix des formateurs, le logiciel « Scan Implant » ne fournit pas de reconstruction 3D de la mâchoire. Aussi, l'apprenant doit être capable de réaliser cette reconstruction de manière mentale afin d'anticiper le résultat de sa planification.

6.2) L'interaction du poste étudiant avec VirTeaSy

VirTeaSy et le poste étudiant offrent une solution intégrant les phases de planification et de chirurgie. Le poste étudiant et VirTeaSy partagent le scanner initial réalisé dans la bouche du patient réel. La démarche pour l'apprenant consiste à réaliser sa planification sur le poste étudiant en utilisant le logiciel de planification décrit précédemment puis de transférer les données de cette planification vers VirTeaSy afin d'y réaliser sa chirurgie. Ces données sont utilisées par l'EVAH pour évaluer les actions de l'apprenant et paramétrer les aides qui seront disponibles.

Une fois la chirurgie virtuelle terminée, les données permettant de l'évaluer ainsi que l'enregistrement vidéo de cette chirurgie sont transférés vers le poste étudiant. L'apprenant peut y revoir sa chirurgie, conduire une analyse réflexive de son activité (seul ou avec l'aide d'un professeur) ou encore de visualiser la manière dont un expert a traité le cas clinique (vidéos, images, commentaires). L'apprenant peut aussi prolonger son apprentissage sur ce poste en consultant des cours théoriques en relation avec le cas clinique traité ou en réalisant un nouveau cas clinique. La Figure 5–17 ci-dessous illustre la boucle d'apprentissage dans laquelle s'inscrit l'interaction entre le poste étudiant et VirTeaSy : préparation (planification) – mise en action (opération virtuelle) – retour sur sa propre activité (analyse réflexive et rétrospective).

Figure 5–17 : Illustration de la boucle d'apprentissage entre le poste étudiant et VirTeaSy



7) Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était de présenter le passage de l'analyse de l'activité à la conception d'un EVAH. Il s'agissait de concevoir un EVAH en implantologie dentaire permettant à des novices de construire la structure conceptuelle de la situation et de faire les liens entre les concepts, variables et indicateurs (Pastré, 1999). Pour ce faire, nous avons mis en place une méthodologie de conception en cinq étapes qui s'inspire en partie des travaux de Chen et al. (2004) et ceux de Vidal-Gomel (2005).

Dans la première étape, nous avons opté pour un EVAH de type pleine échelle avec un haut niveau de réalisme car nous nous adressons à des dentistes diplômés et que l'objectif final de notre EVAH est le transfert d'apprentissage du virtuel au réel (Alessi, 1988). Dans la seconde étape, nous avons défini l'environnement virtuel et les situations d'apprentissage. Des raisons économiques et informatiques ont conduit à limiter le périmètre de l'environnement virtuel aux informations significatives pour l'implantologie dentaire : le retour d'effort porte uniquement sur l'os à forer et les dents adjacentes ; et seules les étapes de séquence de forage et de pose d'implant ont été modélisées. Les situations d'apprentissage ont été conçues à partir de cas cliniques réels pour respecter la pédagogie des universités françaises en implantologie dentaire. Dans la troisième étape, nous nous sommes servis des spécificités de la réalité virtuelle pour enrichir les situations d'apprentissage et faciliter la construction de la structure conceptuelle de la situation. Dans cette optique, nous avons mis en place des aides, des évaluations et un système de replay. Dans une quatrième étape, nous avons proposé trois dispositifs pour adapter la difficulté du contenu présenté dans VirTeaSy au niveau de chaque apprenant. Un système de classification des situations d'apprentissage basé sur les variables de la structure conceptuelle de la situation permet au formateur de

sélectionner la situation d'apprentissage adéquate en fonction de l'apprenant. Une interface « formateur » permet à l'enseignant d'aider en temps réel l'apprenant et des situations sous formes d'ateliers ont été implémentées pour travailler de manière spécifique sur une difficulté. Dans la cinquième et dernière partie, nous avons montré comment VirTeaSy s'intègre à un système complet de formation à l'implantologie incluant la phase de la planification.

Notre expérience de la mise en œuvre d'une méthodologie de conception d'EVAH a montré qu'il fallait constamment faire des choix. Ces choix reposent dans un premier temps sur la littérature et conduisent à définir des éléments de conception généraux, comme le type d'EVAH et le niveau de réalisme. Ces éléments sont ensuite spécifiés à l'aide des résultats de l'analyse de l'activité. Par exemple, dans notre cas, un niveau de réalisme optimal n'a pu s'appliquer sur l'ensemble des objets de la situation en raison des contraintes informatiques et/ou des coûts de développement. L'analyse de l'activité prend alors toute sa pertinence pour faire des choix spécifiques qui traduiront dans l'EVAH les compétences-clefs que les apprenants doivent construire pour être efficaces. Ainsi, le retour d'effort ne pouvant être appliqué à l'ensemble de la situation, nous avons fait le choix de restreindre la zone à l'os à forer et aux dents adjacentes dans la mesure où ces informations sont ressorties de l'analyse de l'activité comme étant mobilisées dans la structure conceptuelle de la situation en implantologie dentaire.

Finalement, le dispositif de formation à l'implantologie dentaire obtenu comprend deux ensembles qui permettent de mettre en place une boucle pédagogique : Planifier – Opérer virtuellement – Analyser son activité. Cette boucle pédagogique doit permettre aux dentistes de construire la structure conceptuelle de la situation et d'acquérir les compétences nécessaires pour poser des implants dentaires en situation réelle. L'évaluation de cette boucle pédagogique devait constituer l'objectif du chapitre suivant. Cependant, l'état de développement de l'EVAH au moment de la période d'évaluation n'intégrait pas l'ensemble des éléments pédagogiques ci-dessus. Nous avons donc évalué une version Béta de VirTeaSy qui permettait uniquement aux apprenants de construire une habileté motrice spécifique à l'implantologie en utilisant un bras à retour d'effort.

6e chapitre : Étude 2 : évaluation préliminaire de VirTeasy

1) Introduction

La dernière étape dans la démarche de conception adoptée par notre étude consiste en l'évaluation de l'EVAH développé. L'évaluation de VirTeaSy a été conduite dans le cadre du projet « Formarev » labellisé par le « Pôle images et réseaux ». L'objectif de ce projet était de créer et de structurer une future filière de formation en implantologie dentaire basée sur la réalité virtuelle dans la région lavalloise. Pour ce faire, un partenariat a été créé entre la société Didhaptic (propriétaire du simulateur VirTeaSy), la société Haption (fabricant de bras à retour d'effort), le CNAM des Pays de la Loire (organisateur de formation), le CERV (évaluation des EVAH) et Laval Mayenne Technopole (mise à disposition de locaux). La première phase de ce projet a consisté à évaluer le simulateur VirTeaSy en vue de son amélioration.

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 5, cette évaluation portera uniquement sur l'apprentissage d'un geste chirurgical compte tenu de l'état d'avancement de l'EVAH au moment de l'évaluation.

Ce chapitre est organisé en deux parties. La première partie est consacrée à une revue de littérature des approches et outils utilisés pour évaluer les EVAH du domaine dentaire intégrant une interface du type haptique pour apprendre une ou des habiletés motrices. La seconde partie présentera l'étude sur l'évaluation de VirTeaSy.

2) Approches et outils utilisés pour évaluer les EVAH « haptiques » du domaine dentaire

Une première consultation des bases de données (Web of Science) croisant les mots-clés « Virtual reality » ou « Simulator », « Dental implant » ou « Dental implantology » et « Haptic feedback » ou « Haptic interaction » n'a donné aucun résultat. Cette absence d'étude dans le domaine considéré souligne l'originalité du développement et de l'évaluation d'un EVAH de type haptique dans le domaine de l'implantologie dentaire. Nous avons élargi notre recherche aux évaluations d'EVAH du domaine dentaire en général et à des EVAH intégrant des modèles physiques supports au développement d'habiletés motrices.

Après la lecture des seize travaux de recherche identifiés, nous avons classé ces études en cinq catégories en fonction du type d'évaluation réalisée :

1. Évaluation par questionnaire de satisfaction ;
2. Évaluation par comparaison experts/novices ;
3. Évaluation par comparaison d'un pré-test et d'un post-test dans une tâche d'apprentissage sur EVAH ;
4. Évaluation par comparaison entre une formation traditionnelle et une formation par la réalité virtuelle ;
5. Évaluation par étude du transfert d'apprentissage du virtuel au réel.

Nous présentons successivement chacune de ces catégories que nous illustrons par une étude caractéristique. Les principaux travaux recensés (11/16) pour cette revue de littérature sont présentés dans un tableau récapitulatif (Tableau 6–6, p.164). Les différents EVAH utilisés dans les études suivantes ont été présentés et décrits dans notre chapitre 2.

2.1) Évaluation par questionnaire de satisfaction

Les études basées sur les questionnaires de satisfaction sont des études préliminaires qui visent à valider l'utilité d'un EVAH pour l'apprentissage d'une habileté motrice et à identifier les éventuelles difficultés rencontrées par les utilisateurs pour orienter les futurs développements. Nous avons recensé quatre études de ce type : une pour l'EVAH IDSS (Johnson et al., 2000) ; deux pour l'EVAH Periosim© (Steinberg et al., 2007 ; Luciano et al., 2009) et une pour l'EVAH Voxel-Man Dental (Pohlenz et al., 2010).

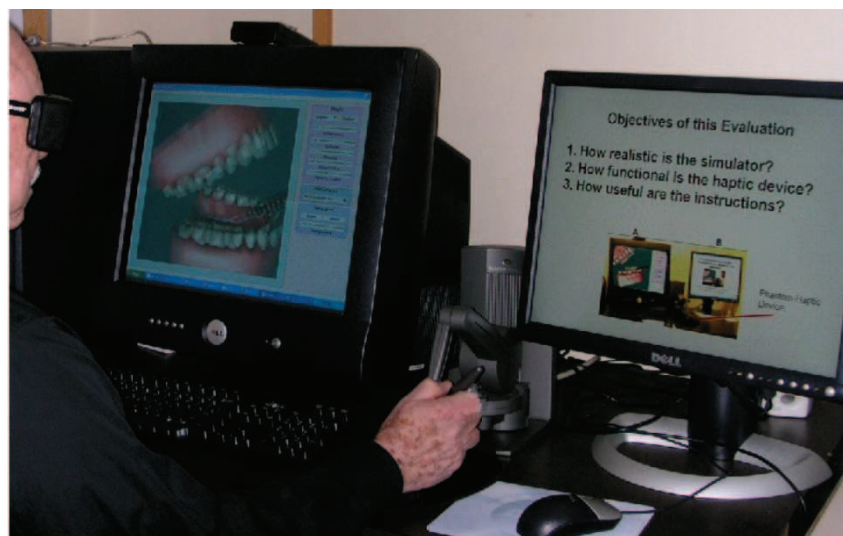
Nous présentons ci-dessous l'étude de Steinberg et al. (2007).

2.1.1) Objectif

L'objectif de l'EVAH Periosim© est de former aux compétences techniques de base en parodontie⁴⁴, en diminuant le temps d'intervention des professeurs. Cet EVAH est composé d'un stylet relié au périphérique haptique qui permet de ressentir les différentes structures anatomiques (dent, racine, couronne, gencive), d'un écran stéréoscopique pour visualiser les structures anatomiques en 3D et d'un écran 2D pour suivre les instructions des exercices (Figure 6–1).

⁴⁴ La parodontie est la partie de la dentisterie qui est spécialisée dans le traitement du parodonte, c'est-à-dire les tissus de soutien de la dent : gencive, os alvéolaire, cément et ligament alvéolo-dentaire.

Figure 6–1 : Illustration de l'EVAH Periosim© avec double écran



La première étude de Periosim© a été réalisée par Steinberg et al. (2007). Le but de cette étude était d'évaluer si la faculté dentaire de l'Illinois considérait cet EVAH comme suffisamment réaliste pour être utilisé en formation et dans l'évaluation des interventions parodontales de bases avec des étudiants. Plus précisément, cette étude a d'une part, étudié le sentiment de réalisme de l'EVAH chez des professeurs en dentaire en utilisant un questionnaire et d'autre part, recueilli des informations pour orienter les futurs développements.

2.1.2) Protocole

Le Tableau 6–1 présente les caractéristiques principales de cette étude.

Tableau 6–1 : Protocole de l'expérimentation de Steinberg et al. (2007)

Sujets	Protocole	Type d'évaluation
30 professeurs de différentes spécialités dentaires	Tâche de familiarisation suivie de 5 exercices dans l'EVAH	Questionnaire de satisfaction avec échelle de Likert de 1 à 7.

Après chaque exercice, le sujet répondait au questionnaire. Celui-ci comportait trois dimensions : le réalisme visuel, le réalisme des sensations tactiles (instruments, textures des dents et de la gencive) et l'utilité de l'EVAH pour l'enseignement dentaire. Les sujets utilisaient une échelle de Likert en 7 points. Les chercheurs ont estimé qu'une note moyenne supérieure à 5 pour un item signifiait que la dimension évaluée donnait satisfaction. Deux analyses statistiques ont été réalisées : une analyse de moyenne des notes et de leur intervalle

de confiance et un test de Spearman permettant d'étudier les corrélations entre la note de réalisme, la note d'utilité pédagogique et les caractéristiques individuelles des sujets (nombre d'heures par jour passées devant des jeux vidéos).

2.1.3) Résultats

Les résultats ont montré que l'image en 3D des dents (couronnes, racines, arcades dentaires supérieures et inférieures) et des instruments (sonde et explorateur parodontal) ont été jugés réalistes par les sujets. Par contre, les images 3D de la gencive (couleur et contour) n'ont pas été jugées réalistes. Concernant les sensations tactiles, les sensations pour les dents ont été jugées réalistes, alors que les sensations pour la gencive ne l'ont pas été. Les auteurs expliquent ces différences par les algorithmes de collision utilisés. Ces algorithmes sont mieux maîtrisés pour les objets durs que pour les objets mous de l'environnement virtuel.

L'utilité de l'EVAH pour la formation était jugée satisfaisante. Les résultats indiquent que, plus un professeur est expert, plus son degré de confiance dans l'EVAH augmente. De même, plus les professeurs se sentent confortables avec l'EVAH, plus ils trouvent un intérêt à son utilisation. Enfin, l'âge des professeurs ne ressort pas comme un frein à l'utilisation de l'EVAH.

2.1.4) Conclusions et limites de l'étude

Bien que l'EVAH Periosim © n'en soit qu'à ses débuts, la faculté dentaire de l'Illinois a décidé de l'intégrer à son cursus de formation dans la mesure où elle pense qu'il peut contribuer à l'évaluation des habiletés motrices de base. Au niveau des limites, il faut noter que 1) le questionnaire de satisfaction a été réalisé par un professeur en dentaire et qu'il n'a pas été validé scientifiquement et 2) un phénomène de collage de la pointe de l'instrument sur la gencive a été constaté à plusieurs reprises.

L'ensemble des études utilisant des questionnaires pour évaluer des EVAH ont montré que 1) l'utilisation d'EVAH à interaction « haptique » pour la formation dentaire est appréciée par les experts, même s'il reste des améliorations à apporter au niveau de la sensation tactile (Johnson et al., 2000) ; 2) la visualisation et la sensation tactile pour les dents sont jugées réalistes même s'il reste des progrès à réaliser dans ces deux domaines (Luciano et al., 2009) et 3) la grande majorité des sujets étaient globalement enthousiastes à utiliser l'EVAH comme méthode de formation additionnelle tout en recommandant d'ajouter plus d'exercices dans les futurs développements des EVAH (Pohlenz et al., 2010).

Ces études d'évaluation des EVAH de type « haptique » du domaine dentaire basées sur des questionnaires de satisfaction, bien que discutables en termes de validation des questionnaires utilisés et du nombre de sujets mobilisés, indiquent une satisfaction des participants. Professeurs (experts du domaine) et étudiants (novices) croient au potentiel de ces EVAH pour apprendre et évaluer une habileté motrice de base dans le domaine dentaire.

Pour compléter ces études, certains chercheurs ont étudié la comparaison des performances entre des experts et des novices dans la réalisation d'une habileté motrice sur un EVAH à interface haptique.

2.2) Évaluation par comparaison entre experts et novices

L'étude de Suebnukarn (Suebnukarn, Phatthanasathiankul, Sombatweroje, Rhienmora et Haddawy, 2009) est la seule étude à utiliser une comparaison experts/novices pour évaluer un EVAH du domaine dentaire à interaction haptique.

2.2.1) Objectif

L'objectif de cette étude était d'identifier s'il existait des différences en termes de performance entre des experts et des novices dans la préparation d'une couronne sur un EVAH utilisant un bras à retour d'effort. Elle a utilisé l'EVAH haptique développé pour l'université de Thammasat en Thaïlande.

2.2.2) Protocole

Le Tableau 6-2 présente les caractéristiques principales de cette étude.

Tableau 6-2 : Protocole de l'expérimentation de Suebnukarn et al. (2009)

Sujets	Protocole	Type d'évaluation
10 sujets novices 10 sujets experts	Phase de familiarisation (5 min) Réalisation d'une tâche 3 fois	Comparaison des performances des experts et des novices dans la dernière tâche réalisée

Tous les participants étaient droitiers et n'avaient jamais manipulé de bras à retour d'effort préalablement. Les compétences en informatique des sujets ont été évaluées à l'aide d'un questionnaire. La tâche demandée consistait à préparer une couronne métal-céramique sur l'incisive centrale supérieure gauche. Elle nécessitait la réalisation de onze étapes. Pour chaque étape, l'EVAH a enregistré la durée, la force appliquée sur le bras à retour d'effort et l'angulation du bras à retour d'effort. Enfin, le résultat final de la préparation de la couronne a été noté par un expert du domaine. L'étude a comparé, pour chaque mesure, la moyenne du groupe novice à la moyenne du groupe expert à l'aide d'un test de Student.

2.2.3) Résultats

Les résultats ont montré que les experts étaient significativement meilleurs que les novices pour la note donnée par l'évaluateur. Ils réalisaient aussi la tâche plus rapidement que les novices. Enfin, les forces appliquées et les angulations du bras à retour d'effort étaient significativement différentes entre les deux groupes.

2.2.4) Conclusions et limites de l'étude

Les résultats de l'étude sont en accord avec d'autres études sur la comparaison entre experts et novices (Wierinck, Puttemans, Swinnen et Van Steenberghe, 2007) pour l'utilisation d'EVAH « modèle physique » dans le domaine dentaire ; et pour l'apprentissage d'habileté motrice en général (Ericsson, 2004). La force de ces études est la possibilité d'enregistrer automatiquement tous les paramètres d'évaluation souhaités. Ceci permet de recueillir des données liées à la performance des sujets experts ou novices à chaque étape de la tâche à accomplir, ce que n'offre pas une formation traditionnelle.

Les EVAH de type haptique du domaine dentaire permettent de distinguer les experts des novices. Pour autant, ce type d'étude ne renseigne pas sur les apprentissages construits par les experts et les novices au contact de l'EVAH. Les études évaluant les EVAH par comparaison des performances entre une tâche avant et après une formation dans l'environnement virtuel apportent des indications dans ce domaine.

2.3) Évaluation par comparaison entre un test pré et post-formation en EVAH

L'étude de Suebnukarn (Suebnukarn, Haddawy, Rhienmora et Gajananan, 2010) est la seule étude à évaluer un EVAH du domaine dentaire à interaction haptique par une comparaison entre test avant et après une formation sur EVAH.

2.3.1) Objectif

Les objectifs de l'étude étaient d'évaluer l'apprentissage d'une habileté motrice en endodontie⁴⁵ dans un EVAH et d'identifier les variables permettant de quantifier cette acquisition. L'EVAH utilisé est celui de l'université de Thammasat en Thaïlande.

⁴⁵ L'endodontie est la partie de l'odontologie qui traite l'intérieur de la dent. Elle consiste à traiter et prévenir des infections péri-apicales. Le dentiste réalise le traitement endodontique d'une dent lorsque celle-ci ne peut plus être gardée vivante, soit parce qu'elle est déjà nécrosée, soit parce qu'elle risque de le devenir.

2.3.2) Protocole

Le Tableau 6–3 présente les caractéristiques principales de l'étude.

Tableau 6–3 : Protocole de l'expérimentation de Suebnukarn et al. (2010)

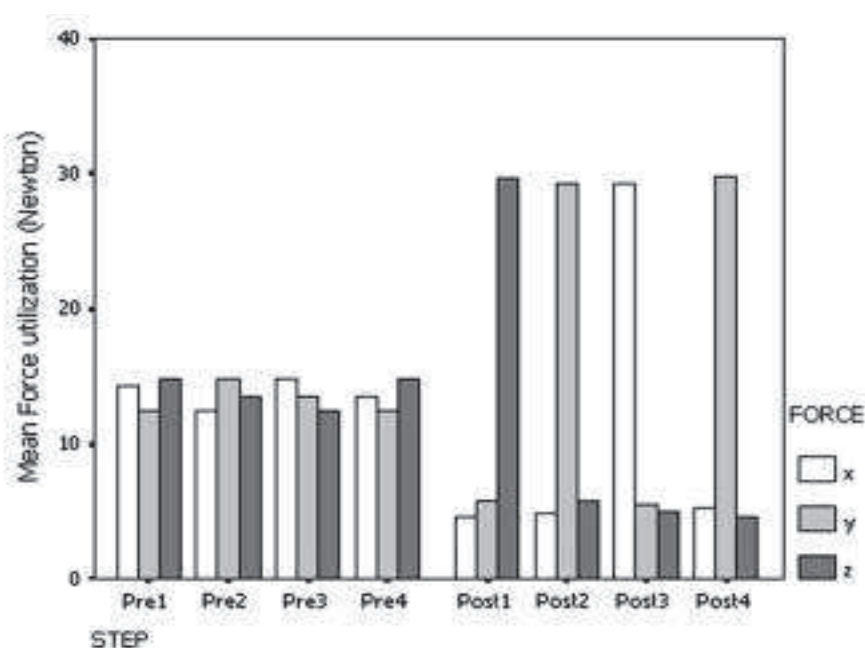
Sujets	Protocole	Type d'évaluation
20 sujets de 4 ^{ème} année de faculté dentaire âgés de 20 à 23 ans Sujets novices sur des interventions de type « Endodontie ».	1. familiarisation (15 min) 2. pré-test (immédiatement après familiarisation) 3. formation sur EVAH (3 jours après pré-test) sous forme de 5 sessions 4. post-test (7 jours après formation)	Mesures sur : 1. le temps pour accomplir la tâche 2. les forces appliquées sur les trois axes 3. distance parcourue par l'instrument du dentiste 4. note d'évaluation données par un expert du domaine

La tâche utilisée pour le pré-test et post-test dans l'EVAH haptique consistait à effectuer une ouverture (un chemin d'accès à l'intérieur de la dent) sur la première molaire supérieure droite. Seul le dernier des cinq essais a été pris en compte pour l'évaluation de la performance des sujets. Durant la formation et à la fin de chaque essai, les sujets bénéficiaient de feedback concernant les déplacements de leur pièce à main (instrument du dentiste) et la performance globale réalisée. Un test de Student a été réalisé pour comparer les performances des sujets avant et après formation sur les quatre mesures retenues.

2.3.3) Résultats

Les résultats ont montré qu'après la formation, les sujets sont plus rapides, parcourent moins de distance avec leur instrument et obtiennent une meilleure note avec l'expert. Le bilan des forces appliquées sur le périphérique haptique indique des différences significatives entre pré et post-test. En pré-test, les sujets appliquent la même force sur les trois axes tandis que dans la phase de post-test, ils appliquent une force seulement sur l'axe permettant de réaliser efficacement l'action demandée. La Figure 6–2 présente les comparaisons entre les forces appliquées sur les trois axes par les sujets durant les quatre étapes de la tâche de pré-test et celles de post-test.

Figure 6–2 : Illustration des forces appliquées en phases de pré et de post-test



2.3.4) Conclusions et limites de l'étude

Les performances des sujets, avant et après formation, relevées dans cette étude indiquent qu'il est possible d'apprendre une habileté motrice du domaine dentaire en environnement virtuel. Les quatre indicateurs de la performance utilisés dans l'étude s'avèrent utiles à la mesure objective des acquisitions des sujets dans cet EVAH. Partant de ce constat, des études se sont attachées à comparer les performances de sujets après formation traditionnelle ou après formation par la réalité virtuelle.

2.4) Évaluation par comparaison entre une formation traditionnelle et formation en réalité virtuelle

Pour identifier les bénéfices éventuels des formations utilisant les technologies de la réalité virtuelle, plusieurs études dans le domaine dentaire ont été menées. Dans ces études, les technologies de réalité virtuelle utilisées correspondent à des EVAH basés sur une interaction « modèle physique ». Elles utilisent plus précisément le système Dentsim. Ces formations sur Dentsim sont comparées à des formations dites « traditionnelles » utilisant le plus souvent le système Kavo⁴⁶.

Le principe de ces études est de comparer les performances de sujets novices (étudiants en faculté dentaire) suivant l'une ou l'autre des formations. L'étude de Jasinevicius

⁴⁶ <http://www.kavo.com/Default.aspx?navid=5210&oid=002&lid=fr> Visité le 07/06/11

(Jasinevicius, Landers, Nelson et Urbankova, 2004) est caractéristique des travaux de ce domaine.

2.4.1) Objectif

L'objectif de cette étude était de déterminer s'il existait des différences significatives entre une formation en réalité virtuelle (Système Dentsim) et une formation traditionnelle (système Kavo). Plus particulièrement, elle s'est intéressée à la qualité des soins dentaires réalisés par les étudiants (niveau de performance) et au temps passé par le professeur à donner des instructions et des rétroactions.

2.4.2) Protocole

Le Tableau 6–4 présente les caractéristiques principales de l'étude.

Tableau 6–4 : Protocole de l'expérimentation de Jasinevicius et al. (2004)

Sujets	Protocole	Type d'évaluation
<p>Sujets novices sur la formation et le système utilisé, titulaires de la 1^{ère} année dentaire, et classés en trois catégories (faible, moyen, bon) selon la note obtenue en cours d'anatomie dentaire.</p> <p>Chaque catégorie est répartie de façon aléatoire en 2 groupes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - sujets formés par la réalité virtuelle (n=15) - sujets formés traditionnellement (n=13) 	<p>Pour les 2 groupes : 10 jours de formation (3h/jour). Mêmes professeurs, même contenu, mêmes critères d'évaluation, même ratio prof/étudiant (1 pour 4).</p>	<p>Groupe formation RV : enregistrement de chaque essai et feedback à l'étudiant sur sa performance</p> <p>Groupe formation traditionnelle : feedback du professeur sur la performance des étudiants</p>

A la fin de la session de formation, trois préparations dentaires par étudiant ont été sélectionnées au hasard (une préparation par type d'exercice) pour évaluer la qualité des préparations (*y a-t-il une différence entre les deux groupes ?*). Deux spécialistes du domaine ont évalué visuellement les préparations en utilisant l'échelle suivante : « 4 = *excellent*, 3 = *cliniquement acceptable*, 2 = *cliniquement acceptable avec des modifications mineures*, 1 = *cliniquement inacceptable* ».

Quinze pour cent des préparations ont été réévaluées pour déterminer la fiabilité intra-évaluateur. La fiabilité inter-évaluateur a été également analysée. Ces deux types de fiabilité ont été testés à l'aide du test de corrélation de Pearson. Enfin, une analyse de variance (test post hoc de Sheffe) a été réalisée pour déterminer si la qualité des préparations était influencée par la note obtenue par l'étudiant au cours d'anatomie dentaire.

Durant la formation, toutes les interactions professeur-étudiant ont été notées dans un journal. Pour chaque interaction, les auteurs ont noté : a) le numéro d'identification de l'élève ; b) le groupe d'appartenance ; c) la durée de l'interaction, d) une brève description du type d'interaction. Chaque interaction a été classée en cinq catégories selon qu'elle était liée à la technique, à la préparation dentaire, à l'ergonomie, à l'évaluation finale de la préparation ou relevait d'une autre catégorie (autres). Dans le but de déterminer des différences entre les deux groupes, les chercheurs ont réalisé plusieurs tests statistiques sur l'ensemble des variables : le test de Student, le test du X^2 , le test U de Mann-Whitney.

2.4.3) Résultats

Les résultats ont montré une fiabilité inter et intra-évaluateur. Le groupe réalité virtuelle a réalisé significativement plus de préparations et en moins de temps que le groupe formation traditionnelle (430 contre 310). En termes de qualité de préparation, l'analyse a montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les groupes. Par contre il y avait un lien entre la note obtenue au cours d'anatomie dentaire et la qualité des préparations : plus l'étudiant a obtenu une bonne note au cours d'anatomie dentaire, plus ses préparations étaient de qualité.

Concernant les interactions, il existait des différences significatives entre les deux groupes. La durée totale des interactions était de 44.3 heures avec 7.8 heures pour les quinze sujets formation réalité virtuelle (0.5h/sujet en moyenne) et 36.5 heures pour les treize sujets formation traditionnelle (2.8h/sujet en moyenne). La durée de chaque interaction était en moyenne plus courte pour le groupe réalité virtuelle ($1.91 \pm 2,0$ minutes) que pour le groupe formation traditionnelle ($4,0 \pm 3,4$ minutes). Le nombre d'interactions était également plus faible pour le groupe réalité virtuelle (16 interactions en moyenne par sujet) que pour le groupe formation traditionnelle (42 interactions en moyenne par sujet). De plus, il faut noter qu'il y avait une faible différence entre les deux groupes lors de la première semaine mais que cette différence s'est accrue dès la deuxième semaine de formation.

2.4.4) Conclusions et limites de l'étude

Cette question des rétroactions fournies aux étudiants constitue une préoccupation dominante des centres de formation. Selon l'étude de Jasinevicius et al. (2004), ceux-ci se heurtent à un manque de professeurs couplé à un programme de formation dense pour les étudiants. Pour certains auteurs (Jasinevicius et al., 2004 ; Buchanan, 2004 ; Leblanc, Urbankova, Hadavi et Lichtenthal, 2004), l'utilisation d'EVAH du type Dentsim pourrait constituer une solution aux problèmes rencontrés par ces centres de formation. Ils supportent l'hypothèse que les interactions fournies par l'EVAH aux étudiants sont efficaces pour apprendre les gestes du métier et permettent de libérer du temps pour l'enseignant.

Pour confirmer cette hypothèse, les études de ce domaine ont utilisé soit le protocole précédemment décrit dans l'étude de Jasinevicius et al. (2004), soit un protocole basé sur la comparaison d'un groupe d'étudiants formé par une association formation traditionnelle et formation en EVAH à un groupe formé uniquement de manière traditionnelle. Les résultats montrent que les étudiants du premier groupe (traditionnelle + RV) améliorent leurs performances au cours de l'année. L'étude de Leblanc et al. (2004) conclut par exemple que l'addition d'une formation EVAH est une méthode efficace pour améliorer les habiletés motrices dans le domaine dentaire.

Pour autant, Quinn, Keogh, McDonald et Hussey (2003a, 2003b) ont mobilisé ces deux types de protocole en ne dégagant aucune différence significative dans les performances des deux groupes étudiés. Les auteurs concluent que *« l'utilisation de ces systèmes comme méthode de rétroaction et d'évaluation est impropre à l'acquisition d'habileté motrice pour des étudiants novices »* (Quinn et al., 2003a, p164). Ces résultats invitent à nuancer l'intérêt d'un système de réalité virtuelle pour apprendre aux étudiants les gestes de leur métier.

Les études précédentes n'apportent aucune information sur la capacité des EVAH à apprendre aux étudiants des gestes qu'ils pourront utiliser en situation réelle d'intervention. Ce type de question renvoie à la notion de transfert des apprentissages.

2.5) Évaluation par étude du transfert d'apprentissage du virtuel au réel

A notre connaissance, seule l'étude de Von Sternberg et al. (2007) s'est intéressée au transfert d'apprentissage du virtuel au réel dans le domaine dentaire à partir d'un EVAH basé sur une interaction « haptique ».

2.5.1) Objectif

Cette étude a mobilisé l'EVAH Voxel-Man Dental. L'objectif de l'étude était triple. Elle cherchait à déterminer si l'EVAH pouvait : 1) réduire les complications vécues par les étudiants lors de la première apicectomie⁴⁷ sur mâchoire de porc, 2) réduire le nombre de répétitions nécessaires pour maîtriser une technique chirurgicale avant de la réaliser sur de vrais patients, 3) influencer la capacité des étudiants à évaluer leurs propres performances (capacité d'auto-évaluation).

⁴⁷ L'apicectomie est l'ablation de la partie apicale d'une racine dentaire. Pour réaliser cette opération, il est nécessaire de faire une ouverture dans la gencive et l'os du maxillaire, ce que l'on appelle apicostomie, ou plus exactement apicotomie.

2.5.2) Protocole

Le Tableau 6–5 présente les caractéristiques principales de l'étude.

Tableau 6–5 : Protocole de l'expérimentation de Von Sternberg et al. (2007)

Sujets	Protocole	Type d'évaluation
<p>40 étudiants en dentaire de niveau identique novices dans la réalisation de la tâche demandée (apicectomie) répartis aléatoirement en deux groupes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Groupe 1 (n=20) en formation avec le système Voxel-Man Dental ; - Groupe 2 (n=20) groupe contrôle sans formation. 	<p>Le groupe 1 a réalisé 9 apicectomies au total pour chaque niveau d'aide proposé par l'EVAH : 3 sans aide, 3 avec aides de base, 3 avec aides avancées.</p> <p>A la fin de la formation, les deux groupes ont réalisé une apicectomie sur dent de porc (tâche de transfert)</p>	<p>4 variables de mesure de la performance : préservation des structures vitales adjacentes, volume d'os enlevé, écart entre planification et réalisation et temps utilisé pour réaliser la procédure.</p> <p>Variables évaluées par professeur et auto-évaluation par l'étudiant</p>

Les analyses des performances des étudiants à travers les quatre variables d'évaluation retenues ont porté sur deux niveaux. Le premier a consisté à analyser la progression des étudiants (groupe 1) à l'intérieur de l'EVAH. Les quatre paramètres ont été comparés entre le premier et le troisième essai de chaque niveau d'aide (test du X^2). Le deuxième niveau a consisté à comparer les notes obtenues par les deux groupes sur la mâchoire de porc (test de Student) ainsi que la corrélation entre les notes de professeurs et les auto-évaluations des étudiants en utilisant le test de Spearman.

2.5.3) Résultats

Les résultats indiquent une amélioration progressive des étudiants dans l'EVAH. La probabilité de préserver les structures vitales voisines a été multipliée par neuf entre le premier et le dernier essai du niveau sans aide. Le volume osseux moyen enlevé a diminué significativement entre le premier et le troisième essai du niveau d'aide « de base ». Le temps nécessaire pour réaliser la procédure a diminué significativement entre le premier et le troisième essai pour les trois niveaux d'aides (sans aide, aides de base et aides avancées).

Les résultats pour la comparaison des deux groupes sur la mâchoire de porc ont montré une différence significative en faveur du groupe réalité virtuelle pour la probabilité de préserver les structures vitales voisines et le volume d'os moyen. Par contre, il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes pour le temps et l'écart entre la planification et la réalisation. Enfin, le groupe réalité virtuelle a présenté une meilleure corrélation entre les notes des professeurs et les auto-évaluations ($r_s = 0.723$, $P < 0.001$) que le groupe contrôle ($r_s = 0.492$; $P = 0.023$).

2.5.4) Conclusions et limites de l'étude

Cette étude confirme la possibilité d'apprendre une habilité motrice dans un EVAH. Elle montre que certaines dimensions de l'apprentissage construit en formation dentaire par la réalité virtuelle sont transférables du virtuel au réel. Pour autant, les auteurs ont retenu une tâche de réinvestissement sur dent de porc. Bien que ce type de dent soit proche des caractéristiques de la dent humaine, elle n'est pas totalement identique. Les études évaluant les EVAH à interface haptique dans le domaine dentaire sous l'angle du transfert des apprentissages gagneraient à viser un réinvestissement des acquisitions dans les tâches réelles du métier.

2.6) Conclusion sur la revue de littérature

Le Tableau 6–6 détaille l'ensemble des revues recensées pour la présente revue de littérature. Il ressort des différentes études d'évaluation des EVAH à interface haptique du domaine dentaire que :

1. les experts et étudiants du domaine dentaire utilisant ces dispositifs se disent satisfaits de leur utilisation et y trouvent un intérêt pour la formation ;
2. les experts obtiennent de meilleures performances que les novices dans l'EVAH. Ils réalisent plus vite les tâches demandées et appliquent de manière plus appropriée que les novices les forces sur les structures anatomiques ;
3. les étudiants formés par des dispositifs de réalité virtuelle obtiennent un niveau de performance équivalent à des étudiants formés de manière traditionnelle mais un avec un temps de pratique inférieur et en sollicitant moins d'interactions avec le professeur ;
4. certaines dimensions de l'apprentissage en réalité virtuelle apparaissent transférables à une situation réelle de pratique.

Notre étude de validation de Virteasy s'inscrit dans le paradigme des évaluations basées sur le transfert. Nous pensons en effet que la finalité des EVAH est de permettre aux apprenants de construire des habiletés utiles dans l'exercice de leur métier. Nous développons ci-après l'étude d'évaluation de VirTeaSy que nous avons réalisée.

Tableau 6–6 : Synthèse des études sur les effets de la réalité virtuelle dans l'apprentissage d'une habileté motrice dentaire

Auteurs et objet d'étude	EVAH	Protocole (sujet, procédure, tâche...)	Résultats
Évaluation par questionnaire de satisfaction			
(Johnson et al., 2000) Évaluer les sensations tactiles et définir les futurs développements	IDSS Haptique	12 experts doivent détecter une carie Phase de familiarisation (2minutes) + 2 exercices	Le périphérique haptique est confortable à utiliser, le joystick est préféré à l'outil dentaire, il est aisé de se concentrer sur la tâche demandée ; une image en 2D est suffisante. Mais la satisfaction est mitigée sur le ressenti tactile et la position de mains.
(Steinberg et al., 2007) Évaluer les sensations tactiles et définir les futurs développements	Periosim Haptique	30 experts doivent réaliser des exercices de base en parodontie Familiarisation + 5 exercices (35 minutes au total)	Les images 3D et les sensations tactiles des dents (couronnes, racines, arcades dentaires) et des instruments (sonde et exploreur parodontal) sont jugées réalistes. Par contre, les images 3D et les sensations tactiles de la gencive (couleur et contour) sont jugées non réalistes.
(Luciano et al., 2009) Évaluer l'utilisation et le potentiel d'acceptation de l'EVAH pour les procédures parodontales	Periosim Haptique	18 experts et 5 étudiants en dentaire réalisent un détartrage de dent 1 exercice (10 minutes)	Facile de s'adapter à l'EVAH, de l'utiliser et de naviguer dans la scène 3D. Même les deux utilisateurs qui ont eu des difficultés à s'adapter au système, ont quand même été capables de l'utiliser après quelques minutes de pratique, mais ils ont évalué l'EVAH plus négativement que les autres sujets. Dans les 10 minutes imparties, tous les utilisateurs ont été en mesure de sonder le sillon gingival et d'établir sa profondeur.
(Pohlenz et al., 2010) Évaluer l'EVAH à travers un questionnaire de satisfaction	Voxel-Man Dental Haptique	53 étudiants en dentaire réalisent une apicectomie 1 exercice	La grande majorité (entre 81.1% et 92.7%) des sujets ont jugé « très bien » ou « bien » tous les items du questionnaire à savoir : l'utilité d'inclure une formation sur EVAH; les sensations fournies par le périphérique haptique ; la perception de l'affichage stéréoscopique (navigation spatiale) ; la résolution de l'affichage ; et l'intégration des pathologies ajoutées artificiellement
Évaluation par comparaison experts / novices			
(Suebunakarn et al., 2009) Identifier les différences de performances entre des experts et des novices	EVAH haptique (faculté Thammasat, Thaïlande)	10 experts / 10 étudiants en dentaire réalisent une préparation d'une couronne métallo-céramique Familiarisation + 3 essais	Les experts sont significativement meilleurs et plus rapides que les novices. Ils utilisent également des intensités de force et des angulations d'instruments différentes des novices.
Évaluation par comparaison d'un pré-test et d'un post-test			
(Suebunakarn et al., 2010) Evaluer l'acquisition d'habileté motrice en endodontie et identifier les variables qui permettent de quantifier cette acquisition	EVAH haptique (faculté Thammasat, Thaïlande)	20 étudiants en dentaire réalisent un chemin d'accès conduisant à l'intérieur de 1 ^{ère} molaire supérieure droite Familiarisation / Pré-test (3 essais) / Formation (25 essais) / Post-test (3 essais)	Après la formation, les sujets ont été plus rapides, ont parcouru moins de distance, et ont obtenu une meilleur note. Le bilan des forces appliquées sur le périphérique haptique a montré qu'avant la formation, peu importe l'étape et l'action à réaliser, les sujets appliquaient la même force sur les trois axes ; alors qu'après la formation, les sujets appliquent une force seulement sur l'axe qui permettait de réaliser l'action demandée.

Évaluation par comparaison entre une formation traditionnelle et une formation par la réalité virtuelle			
(Jasinevicius et al., 2004) Déterminer s'il existe des différences entre une formation réalité virtuelle et une formation traditionnelle	Dentsim Modèle physique	38 étudiants en dentaire répartis en 2 groupes (formation RV / traditionnelle) réalisent des préparations de cavité. 10 jours, 3 heures par jour	Pour des performances égales, le groupe réalité virtuelle a réalisé significativement plus de préparations et en moins de temps que le groupe formation traditionnelle. Le groupe réalité virtuelle a sollicité 5 fois moins de feedbacks de la part des professeurs que le groupe formation traditionnelle.
(Buchanan, 2004) Démontrer scientifiquement l'efficacité des EVAH (3 études)	Dentsim Modèle physique	16 étudiants en dentaire répartis en 2 groupes (formation RV/ traditionnelle) réalisent des préparations de cavité / 3 semaines (plusieurs sessions de 2 heures)	Pour des performances égales, le groupe réalité virtuelle (évaluation fournie par le système Dentsim) a demandé plus d'évaluation que le groupe formation traditionnelle (évaluation fournie par le professeur). Le groupe réalité virtuelle a réalisé plus de préparations que le groupe formation traditionnelle
(LeBlanc et al., 2004) Analyser les effets de l'addition d'une formation utilisant un EVAH à une formation traditionnelle pour l'apprentissage d'habileté motrice	Dentsim Modèle physique	67 étudiants en dentaire répartis en 2 groupes (groupe traditionnel n=48 / groupe traditionnel + RV n=19) réalisent des préparations de cavité Formation traditionnelle = 110h / formation RV = 3 sessions de formation réparties sur toute l'année = 10 heures au total	Les 2 groupes ont amélioré leurs scores au fil des examens. Cependant le groupe formation EVAH a eu une amélioration significativement plus importante entre le premier et le dernier examen (+4.8 points) que le groupe formation traditionnelle (+1.4 points)
(Quinn et al., 2003b) Déterminer les bénéfices d'une formation utilisant des technologies de réalité virtuelle	Dentsim Modèle physique	30 étudiants en dentaire réalisent des préparations de cavité : <ul style="list-style-type: none">• Groupe 1 (n=10) = formation traditionnelle 21h, avec rétroaction du professeur ;• Groupe 2 (n=10) = formation traditionnelle 16h + formation RV 5h avec rétroaction du professeur et du système de RV• Groupe 3 (n=10) = formation traditionnelle 16h + formation RV 5h avec du système de RV	Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les groupes au niveau de la performance ce qui a conduit les auteurs à conclure que « l'utilisation de ces systèmes comme méthode de rétroaction et d'évaluation était impropre à l'acquisition d'habiletés motrices pour des étudiants novices »
Évaluation par étude du transfert d'apprentissage du virtuel au réel			
(Von Sternberg et al., 2007) Déterminer si l'EVAH peut 1) réduire les complications lors de la 1 ^{ère} apicectomie sur mâchoire de porc 2) influencer la capacité des étudiants à évaluer leur propre performance	Voxel-Man Dental	41 étudiants en dentaire répartis en 2 groupes (groupe formation RV qui fait 9 essais dans l'EVAH/ groupe contrôle pas de formation) réalisent une apicectomie sur une mâchoire de porc.	Transfert de 2 des 4 variables mesurées dans la tâche de réinvestissement. Le groupe réalité virtuelle est significativement meilleur que le groupe contrôle pour la probabilité de préserver les structures vitales voisines et le volume d'os moyen enlevé. Par contre, il n'y a pas de différence significative entre les 2 groupes pour le temps et l'écart entre la résection planifiée et celle réalisée. Enfin, le groupe réalité virtuelle présente une meilleure corrélation entre les notes des professeurs et les auto-évaluations que le groupe contrôle.

3) Étude pour l'évaluation de VirTeaSy

3.1) Cadre théorique : le transfert d'apprentissage du virtuel au réel

Nous définissons le transfert d'apprentissage en référence à Pennington et al. (1995) pour qui le transfert d'apprentissage est la capacité à utiliser en environnement de travail des connaissances, aptitudes et attitudes apprises en environnement de formation. En d'autres termes, le transfert, correspond au degré selon lequel les apprenants appliquent efficacement leur apprentissage du contexte de formation au contexte d'application (Subedi, 2004). Dans cette perspective, acquérir des connaissances et des habiletés transmissibles pour des chirurgiens-dentistes peut être envisagé comme le principal objectif de toute formation. Le transfert d'apprentissage est le processus par lequel les connaissances construites dans un contexte particulier (tâche source) sont utilisées dans un contexte différent (tâche cible) après avoir été mobilisées, combinées différemment puis adaptées (Pressau et Frenay, 2004).

Le problème du transfert a largement été étudié en psychologie cognitive (Cox, 1997). Cependant, comme la littérature disponible nous le montre, l'intérêt pour ce thème de recherche s'est intensifié au cours des vingt dernières années. De nombreux articles sur le transfert ont été analysés et discutés à travers différents ouvrages (Singley et Anderson, 1989 ; Detterman, 1993 ; Analoui, 1993 ; De Corte, 1999 ; Tardiff, 1999, Haskell, 2001 ; Presseau et Frenay, 2004). Aujourd'hui encore, de nombreux points de vue sont discutés dans la littérature. Même les chercheurs issus de courants théoriques proches semblent avoir des avis divergents quant à son occurrence.

Les divergences se donnent notamment à voir autour de la définition du concept de transfert. Une partie des auteurs semble s'intéresser au contenu du transfert et poursuit comme objectif l'identification du type de connaissances transférées. Pour d'autres auteurs, le transfert n'est pas uniquement une question de contenu. Ces derniers cherchent ainsi à identifier le processus du transfert et sa dynamique. De nombreuses investigations sont ainsi menées dans le contexte de la résolution de problème (Brown, Bransford, Ferrara et Campione, 1983 ; Bracke, 1998 ; Tardiff, 1999 ; Presseau et Frenay, 2004) et du raisonnement par analogie (Gick et Holyoak, 1987 ; Holyoak et Thagard, 1995). Plus particulièrement, les processus dynamiques de compréhension et d'utilisation de connaissances antérieures sont mis en exergue.

3.1.1) *Types de transfert et EVAH*

Différents types de transfert peuvent être distingués au regard de la littérature : le transfert peut être vertical ou horizontal, il peut être proche ou lointain, général ou spécifique et opérer par voie basse ou par voie haute. Nous développons et clarifions successivement ces différentes distinctions observées dans la littérature.

3.1.1.1) Transfert vertical versus transfert horizontal

Le transfert vertical se définit comme l'utilisation qu'un sujet fait directement de ses connaissances antérieures pour apprendre de nouvelles connaissances. Le transfert vertical des habiletés et des connaissances se rapporte à une réplique, une réutilisation des connaissances et des habiletés précédemment acquises à toutes les situations identiques à la situation initiale d'apprentissage. Cette théorie du transfert est basée sur la croyance que l'apprentissage précédent facilite le nouvel apprentissage seulement dans la mesure où la nouvelle tâche contient des éléments identiques à ceux de la tâche précédente (Perkins et Salomon, 1989).

Selon Misko (1995, 1999), ce type de transfert implique souvent des tâches procédurales par nature. Ces tâches incluent des étapes dans lesquelles le sujet doit effectuer un certain nombre d'opérations dans l'ordre. Ces séquences sont répétées chaque fois que la tâche se présente. Ce type de formation procédurale est relativement facile à apprendre et le taux de transfert d'apprentissage est habituellement élevé mais l'apprenant est peu susceptible d'adapter ces habiletés et connaissances, une fois confronté à un nouvel environnement et à des conditions changeantes. Par exemple, Volbracht, Domik, Backe-Neuwaldand et Rickens (1998) ont construit un environnement virtuel reproduisant une ville ("Citygame") afin d'enseigner l'orientation spatiale aux enfants. Le transfert vertical consiste ici à reconnaître et à appliquer les connaissances sur l'orientation spatiale dans la même ville réelle.

Le transfert horizontal concerne l'utilisation et l'application de connaissances pour résoudre un nouveau problème ou pour réaliser une nouvelle tâche où le niveau de complexité importe peu (Tardiff, 1999). Par exemple, Webber, Bergia, Pesty et Balacheff (2001) décrivent un environnement virtuel (« Baghera ») où de jeunes étudiants doivent résoudre des problèmes de géométrie de complexité variable. Le transfert horizontal dépend ainsi de la distance entre le contexte initial et le contexte cible.

3.1.1.2) Transfert horizontal proche versus transfert horizontal lointain

Le transfert horizontal proche se réfère aux études précédemment citées dans lesquelles le transfert est apprécié à partir d'un faible décalage, temporel et de nature, entre la situation d'apprentissage et la situation de réinvestissement. Le transfert lointain se rapporte quant à lui à l'apprentissage de nouvelles habiletés ou à la réalisation de nouvelles tâches dans des situations qui diffèrent de manière significative de la situation d'apprentissage initiale. Les conditions d'apprentissage qui se focalisent sur ce type de transfert invitent l'apprenant à adapter les connaissances et habiletés acquises préalablement comme guide pour exécuter ou apprendre dans des situations évolutives, changeantes ou de nouveaux environnements (Misko, 1995, 1999). Le transfert horizontal lointain dépasse la simple application ou répétition du comportement appris.

La plupart des formations professionnelles se concentre plus sur le transfert procédural et proche que sur le transfert déclaratif et lointain, bien que l'importance du transfert lointain soit reconnue par tous les responsables de formation (Perkins et Salomon, 1989). Par ailleurs, dans le domaine de l'éducation, les environnements virtuels semblent se focaliser sur le

transfert lointain et sa composante déclarative (Hietala et Niemirepo, 1998 ; Webber et al. 2001 ; Popovici et al., 2005).

3.1.1.3) Transfert général versus transfert spécifique

La distinction entre transfert général et transfert spécifique est aussi opérée dans la littérature sur le transfert d'apprentissage. Dans cette distinction, le transfert est considéré comme « général » quand la tâche d'apprentissage est étendue à de nombreux autres domaines de connaissance. Le transfert est dit « spécifique » quand les tâches d'apprentissage et de transfert sont proches ou liées au domaine (Gick et Holyoak, 1983 ; Cormier et Hagman, 1987 ; Perkins et Salomon, 1988, 1989 ; Singley et Anderson, 1989 ; Tardiff, 1999).

D'autres auteurs (Gick et Holyoak, 1987 ; Haskell, 2001) proposent également les termes de « self-transfer » quand la deuxième tâche consiste en une répétition de la première, « near-transfer » quand les deux tâches sont semblables ou « far-transfer » quand les deux tâches sont différentes. « EduAgent » par exemple est un environnement virtuel collaboratif où les apprenants cherchent à résoudre une équation (Hietala et Niemirepo 1998). L'objectif de l'environnement est de développer des compétences collectives transférables à d'autres domaines (transfert général). Finalement, le transfert horizontal dépend de la distance entre le contexte initial et le contexte cible. Dans le cas où cette distance est importante, il peut être considéré comme général ou lointain et quand elle est faible, comme spécifique ou proche.

3.1.1.4) Transfert par voie basse versus transfert par voie haute

Les auteurs qui s'intéressent à la compréhension des processus impliqués dans le transfert et à leur dynamique distinguent le transfert par voie haute du transfert par voie basse (Holyoak et Thagard, 1995 ; Tardiff, 1999 ; Presseau et Frenay, 1999). Le transfert par voie basse correspond au transfert automatique des habiletés apprises par répétition et intervient quand des similitudes de surface entre deux tâches sont décelées. Le transfert par voie haute consiste à extraire des connaissances afin de les soumettre à un contexte particulier ou à les relier à quelque chose de déjà connu par le sujet dans un autre contexte (Perkins et Salomon, 1988). Cette dichotomie peut être liée au modèle des « niveaux de traitement de l'information ».

Craick et Lockart (1972) argumentent sur le fait que plus l'information est traitée en profondeur, plus la rétention est bonne. Le concept de « profondeur d'encodage » met en exergue la distinction entre le codage sensoriel et le codage sémantique. Le premier laisse une trace de surface en mémoire tandis que le second laisse une trace en profondeur. Nous pouvons articuler ces deux niveaux d'encodage avec les types de transfert de la dernière taxonomie: le transfert par voie basse consiste à maintenir l'information en mémoire de travail pour faciliter le transfert vertical ; le transfert par voie haute consiste à faire un effort d'encodage sémantique en mémoire à long terme par l'utilisation de connaissances antérieures.

Pour le transfert proche, les études de Perkins et Salomon (1989) et d'Anderson, Reder et Simon (1996) montrent que l'utilisation du transfert par voie basse s'avère suffisant pour automatiser et pratiquer dans une petite gamme de situations. Cependant, dans le cadre du transfert lointain, l'étude de Perkins et Salomon (1989) montre que le transfert par voie haute

est adéquat. La décontextualisation et la pratique dans une variété de situations différentes le permet. Pour les apprenants, le paradoxe consiste alors à choisir entre un transfert proche en le connectant à une gamme de situations similaires (quantité de pratique et automatisation) ou un transfert lointain recherchant la décontextualisation et la variété.

3.2) Les études sur le transfert du virtuel au réel

Constatant le potentiel des EVAH pour l'apprentissage (Psotka, 1995 ; Rose et al., 2000), un ensemble de travaux a été mené visant à étudier sous différents angles le transfert des apprentissages de l'environnement virtuel au réel. Les résultats rapportés ont été parfois positifs parfois négatifs suivant le type d'apprentissage et le type de transfert étudié (Kozak, Hancock, Arthur, et Chrysler, 1993 ; Willson, Foreman et Tlauka, 1996 ; Cromby, Standen, Newman et Tasker, 1996 ; Regian, 1997 ; Bliss et Guest, 1997 ; Waller, Hunt et Knapp, 1998 ; Brooks et al., 1999).

Dans le domaine de l'apprentissage d'habiletés motrices et au-delà de l'étude de Von Sterberg et al. (2007) présentée plus haut dans le domaine dentaire, les études mobilisant des EVAH récents intégrant des bras à retour d'effort rapportent un transfert du virtuel au réel. Par exemple, l'étude de Rose et al. (2000) montre que l'apprentissage d'un geste simple (déplacer un anneau le long d'un câble en forme de « zigzag ») via une formation dans le virtuel ou une formation dans le réel conduisait au même niveau de performance dans la réalité. De plus, cette étude rapporte que dans certaines conditions (perturbations cognitives et motrices des sujets) la formation dans le virtuel entraînait de meilleures performances dans le réel que la formation dans le réel.

Dans le domaine médical, les études sur le transfert du virtuel au réel sont bien documentées dans le secteur de la laparoscopie. Un ensemble d'études (Torkington, Smith, Rees et Darzi, 2001 ; Seymour et al., 2002 ; Munz, Kumar, Moorthy, Bann et Darzi, 2004 ; Youngblood et al., 2005 ; Cosman et al., 2007) identifient un transfert positif dans ce domaine.

Ces résultats nombreux et favorables au transfert peuvent s'expliquer par le fait que les interventions en laparoscopie se réalisent à l'aide d'un robot. Par conséquent, il est aisé de rapprocher au maximum la situation de formation virtuelle (EVAH haptique) de la situation de réinvestissement (situation clinique sur robot). Des études dans le domaine de l'endoscopie (Lehmann et al., 2005) et de l'ophtalmologie (Peugnet, Dubois, Rouland, 1997) montrent également un transfert positif de virtuel au réel.

Pour que les environnements virtuels soient utiles à toute formation, l'apprenant doit généraliser des expériences semblables en se confrontant à la réalité physique (Bricken, 1991). Cette généralisation d'habiletés acquises en environnement virtuel à un environnement réel ne va pas de soi. En effet, les résultats de l'étude de Kozak et al. (1993) ont montré qu'il n'y avait pas toujours de transfert. Cet échec a été attribué par les auteurs au manque de réalisme de l'environnement virtuel et à la simplicité de la tâche (bouger des boîtes sur des

cibles). Depuis, le réalisme des environnements virtuels a progressé et les tâches sont plus complexes invitant à réinvestir la question du transfert du virtuel au réel.

3.3) Objectif de l'étude et hypothèses

Les études citées précédemment sur l'évaluation du transfert des apprentissages entre un environnement virtuel et une tâche de réinvestissement s'accordent sur l'utilisation d'un protocole comparant les performances d'un groupe recevant une formation traditionnelle à celle d'un groupe formé en réalité virtuelle. Elles s'accordent également sur le choix de la tâche de réinvestissement qui correspond à la tâche réalisée en formation traditionnelle.

Cependant, dans les études du domaine médical, le réinvestissement des apprentissages de sujets novices dans un contexte d'intervention réel pose des problèmes déontologiques. Pour les contourner, de nombreuses études ont utilisé des tâches de réinvestissement mobilisant des artefacts. Rares sont les études qui ont pu construire un protocole permettant le réinvestissement des apprentissages sur le vivant⁴⁸ (Tonetti et al., 2009). Dans le domaine dentaire cependant, aucune étude n'a à ce jour été en mesure de trouver les conditions expérimentales permettant aux sujets de réinvestir les apprentissages construits en formation dans le vivant. Notre étude apporte une contribution à l'étude du transfert des apprentissages du virtuel à une situation réelle dans le vivant.

Plus précisément, nous nous sommes donnés deux objectifs : 1) montrer l'intérêt d'une formation en réalité virtuelle par rapport à une formation traditionnelle ; 2) démontrer que les apprentissages réalisés dans VirTeaSy peuvent être réutilisés en situation réelle.

Pour ce faire, nous allons comparer une formation à l'implantologie réalisée en réalité virtuelle (VirTeaSy) à une formation traditionnelle en implantologie. Plus précisément, cette comparaison entre les deux types de formation se fera à travers l'étude du transfert d'apprentissage de la situation de formation à une situation de réinvestissement la plus proche de la situation réelle d'exercice du métier d'implantologue.

Cette recherche s'est réalisée avec la collaboration de Cyril Bossard, post-doctorant au Centre Européen de Réalité Virtuelle. Lors de la période consacrée à l'évaluation, les développements de VirTeaSy ne permettaient d'évaluer ni la phase de planification de l'intervention, ni la conceptualisation de l'action. L'étude s'est donc centrée sur l'évaluation du transfert de l'habileté motrice à poser de manière efficace un implant dentaire unitaire.

Après analyse, la formation traditionnelle considère l'apprentissage de cette habileté motrice et son transfert en situation réelle comme l'apprentissage d'un ensemble d'étapes⁴⁹

⁴⁸ Pour nous, le terme « vivant » signifie que la situation d'apprentissage se déroule dans des conditions réelles, c'est-à-dire que l'intégralité des structures anatomiques impliquées dans l'intervention chirurgicale sont présentes : la complexité de la situation est conservée. Ainsi, dans ce contexte, l'utilisation de cadavre humain s'apparente à du vivant (l'apprenant intervient dans la bouche d'un patient), alors que l'utilisation d'une structure anatomique esseulée ne s'y apparente pas (ex : réaliser un forage sur une dent extraite).

⁴⁹ Ces étapes correspondent aux parties « 2.1.2) Le forage » et « 2.1.3) La mise en place de l'implant » du chapitre 4.

qui devront être réalisées à l'identique dans la situation réelle (transfert vertical). La situation de formation utilise des mâchoires en plastique qui ont pour objectif de reproduire les conditions du réel (forme, densité osseuse) dans le but d'avoir un faible décalage entre la situation de formation et la situation réelle (transfert proche). De plus, les apprentissages réalisés sont destinés uniquement à l'implantologie, il n'y a pas de volonté de les étendre à d'autres domaines (transfert spécifique). Enfin, les professeurs favorisent la répétition de l'ensemble des étapes dans des conditions identiques (transfert par voie basse).

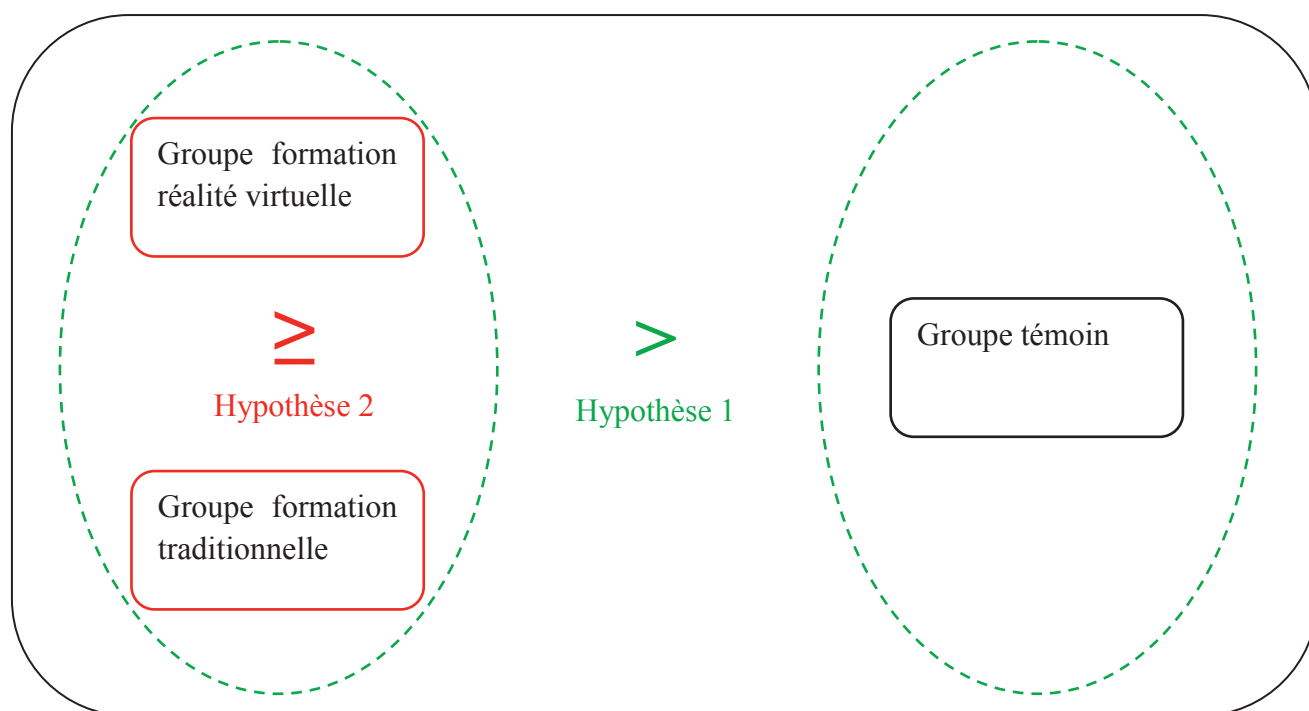
Par conséquent, au vu de la formation traditionnelle et de notre cadre théorique, cette recherche portera sur la comparaison des deux types de formations via l'étude du transfert d'apprentissage d'une habileté motrice d'une situation de formation à une tâche de réinvestissement, ce transfert étant considéré comme vertical, proche, spécifique et par voie basse. Pour atteindre cet objectif et en faisant le postulat que la formation traditionnelle permet de transférer l'apprentissage de l'habileté motrice en situation réelle, nous avons choisi de construire la formation sur EVAH en transposant (en décalquant) le contenu de la formation traditionnelle dans VirTeaSy.

De plus, la revue de littérature précédemment présentée sur l'évaluation des EVAH à interfaces haptiques par étude du transfert des apprentissages révèle des résultats positifs dans le domaine de la laparoscopie (Torkington et al., 2001 ; Seymour et al., 2002 ; Munzet al., 2004; Youngblood et al., 2005 ; Cosman et al., 2007) et dans le domaine dentaire (Von Sternberg et al., 2007).

Nous nous attendons donc à ce que les sujets ayant suivi la formation traditionnelle ou la formation sur VirTeaSy transfèrent leurs acquisitions en situations réelles et par conséquent qu'ils aient des performances significativement plus élevées que les sujets du groupe contrôle ne recevant aucune formation (**hypothèse 1**) (Von Sternberg et al., 2007). Pour valider ou invalider notre première hypothèse, nous comparerons les performances inter-groupes.

Cette première hypothèse est complétée d'une seconde portant sur l'efficacité de la formation à l'implantologie utilisant une voie traditionnelle ou un EVAH. A la suite des études de Jasinevicius et al. (2004), Buchanan (2004), Leblanc et al. (2004) révélant l'efficacité de la formation sur EVAH, nous formulons l'hypothèse que les performances du groupe formé dans VirTeaSy devraient se révéler supérieures ou égales au groupe formé de manière traditionnelle (**hypothèse 2**). Pour ce faire, nous comparerons les performances sur la tâche de réinvestissement des sujets du groupe formé par VirTeaSy à celles du groupe formé de manière traditionnelle. La Figure 6-3 présente le positionnement de ces deux hypothèses par rapport aux données sur la performance des sujets qui seront recueillies dans les trois groupes.

Figure 6-3 : Hypothèses expérimentales



3.4) Méthode

3.4.1) *Participants et procédure*

Trente deux dentistes dont vingt femmes et douze hommes ont été répartis de façon aléatoire dans trois groupes : un groupe (n=10) nommé GRV formé dans VirTeaSy, un groupe (n=11) nommé GT formé de manière traditionnelle et un groupe (n=11) nommé contrôle (GC) ne recevant aucune formation. Tous les sujets étaient novices en implantologie dentaire.

Les études évaluant le transfert du virtuel au réel dans les EVAH utilisent un protocole expérimental identique faisant consensus. Les sujets sont répartis en trois groupes : un groupe suivant une formation dans un EVAH, un groupe suivant une formation dans le réel et un groupe appelé contrôle ne recevant aucune formation. Les formations dans le virtuel et dans le réel sont élaborées pour être identiques ou proches en termes notamment d'exercices réalisés ou du nombre de répétitions. Après un délai généralement d'une semaine, les sujets sont testés sur une tâche de réinvestissement. Les performances respectives des trois groupes sur cette tâche sont comparées pour déterminer le caractère transférable ou non de l'apprentissage.

Dans le domaine médical cependant, le choix de la tâche de réinvestissement constitue un obstacle majeur dans la mesure où le réinvestissement des apprentissages réalisés par des novices sur des cas cliniques de patients réels soulève de nombreux problèmes déontologiques. Trois types de solutions alternatives apparaissent dans la littérature :

- Utilisation de cadavres humains (solution coûteuse et posant des problèmes d'hygiène);

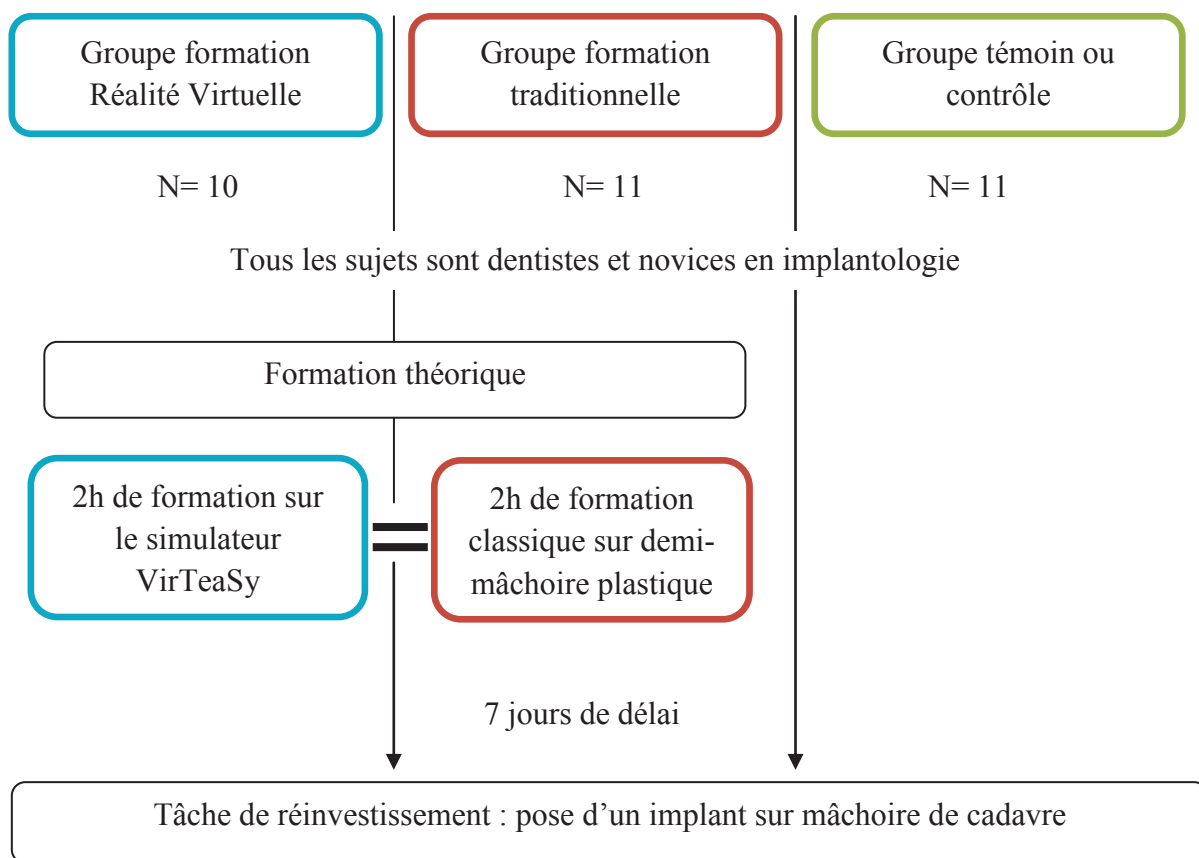
- Utilisation de cadavres d'animaux (leur anatomie peut être éloignée de l'anatomie humaine et solution qui pose des problèmes d'hygiène)
- Réinvestissement sur une tâche utilisée en formation traditionnelle mobilisant le plus souvent un mannequin (solution qui éloigne la tâche réinvestissement de la situation réelle de pratique).

Au regard du contexte local (partenariat avec la faculté dentaire de Brest) et des moyens fournis par le projet Formarev, nous avons opté pour une tâche de réinvestissement sur cadavre humain. Ce type de tâche nous semble la plus proche de la situation réelle d'intervention sur le vivant en implantologie. Par rapport aux études précédemment citées, notre étude est donc originale dans la mesure où aucune étude n'a jusqu'alors analysé le transfert d'une habileté motrice acquise en EVAH vers une tâche de préparation d'un site implantaire sur cadavre humain⁵⁰. Elle mobilise un protocole expérimental validé dans la littérature et évalue une version préliminaire de VirTeaSy. Cette originalité constitue pour autant un réel challenge pour VirTeaSy à ce stade de son développement. La Figure 6-4 présente une vue synthétique du protocole expérimental retenu.

Ce protocole s'est donc déroulé en trois phases. Durant la première phase, les groupes GRVet GT ont suivi une formation théorique identique. Durant la deuxième phase, le groupe GRV a suivi une formation pratique sur le simulateur VirTeaSy et le groupe GT une formation pratique traditionnelle sur demi-mâchoires en plastique. Les temps de pratiques dans ces différentes formations ont été contrôlés et harmonisés. La dernière phase a été consacrée à l'étude du réinvestissement des apprentissages. Après un délai d'une semaine, nous avons évalué les performances des sujets des trois groupes dans la tâche de réinvestissement sur cadavres humains. Cette phase a consisté à poser un implant unitaire molaire mandibulaire sur un cadavre humain .

⁵⁰ L'utilisation de cadavres humains comme tâche de réinvestissement a déjà été réalisée pour évaluer le transfert d'apprentissage du virtuel au réel dans un EVAH de vissage iliosacré percutané (Tonetti et al., 2009). Cependant, l'objectif de cet EVAH était d'apprendre à définir la trajectoire du vissage à l'aide du clavier et d'une souris et non l'apprentissage du geste en lui-même grâce à un périphérique haptique. Par conséquent, les critères d'évaluation étaient le nombre de radiographies prises durant l'intervention ainsi que l'indice de dangerosité de la trajectoire du vissage, et l'étude ne portait pas sur le transfert d'habileté motrice.

Figure 6-4 : Protocole expérimental



3.4.2) Description des formations

L'objectif retenu pour les formations était d'apprendre l'habileté motrice permettant de poser de façon efficace un implant unitaire dans le secteur molaire mandibulaire avec les consignes suivantes : poser l'implant à 90° par rapport à la corticale, au centre de la corticale osseuse et avec la tête de l'implant qui émerge au ras de la corticale osseuse. Cet objectif a été retenu en concertation avec les formateurs de la faculté dentaire de Brest dans la mesure où d'une part, il s'agit de l'implant le plus simple à poser dans l'exercice du métier et d'autre part, ce type d'acte constitue une dimension fondamentale de la formation en implantologie dentaire.

3.4.2.1) Formation théorique

Les sujets des groupes GRV et GT ont suivi une formation théorique de deux heures. Le but de cette formation théorique était double. D'une part, elle a permis aux sujets d'apprendre à réaliser une planification, c'est-à-dire savoir choisir, en fonction de l'étude d'un scanner, les caractéristiques et le positionnement de l'implant. D'autre part, elle a permis d'apprendre à sélectionner le protocole implantaire adéquat en fonction de l'implant sélectionné dans la planification, c'est-à-dire apprendre à sélectionner et ordonner les forets à utiliser pour réaliser le puits de forage.

3.4.2.2) Formation traditionnelle

La formation à la pose de l'implant unitaire en secteur mandibulaire s'est déroulée pour les sujets sur des demi-mâchoires en plastique. Les sujets ont utilisé un contre-angle, un moteur et une trousse implantaire fournis⁵¹ dans le cadre de la formation. Toutes les mâchoires plastiques étaient identiques et totalement édentées.

La formation traditionnelle se déroule en deux temps. Dans un premier temps, le professeur fait une démonstration en mettant en évidence les indicateurs de fin d'étapes (ex : « *la fraise boule doit réaliser un forage de 2 millimètres* ») et en indiquant les critères d'évaluation. Dans un second temps, les sujets organisés en binôme s'exercent à poser des implants⁵² sur des mâchoires en plastique en suivant les consignes indiquées précédemment. La durée totale de la formation a été de deux heures, le temps moyen de pratique par individu étant de trente minutes. La Figure 6-5 présente une illustration de la formation pratique traditionnelle pour un individu.

Figure 6-5 : Illustration de la formation traditionnelle



3.4.2.3) Formation avec VirTeaSy

Dans le but de comparer les formations, nous avons conçu une formation sur VirTeaSy identique à la formation traditionnelle en termes de temps de pratique, informations transmises et mode de présentation de ces informations. Cette formation s'est déroulée en deux temps. Dans un premier le professeur en charge de la formation traditionnelle a fait une démonstration de la préparation du site implantaire sur l'EVAH en mettant en évidence les indicateurs de fin d'étapes et en indiquant les critères d'évaluation comme pour la formation traditionnelle. Dans un second temps et à la suite d'une phase de familiarisation avec l'utilisation de l'EVAH, les dentistes organisés en binômes se sont exercés à poser des implants sur le patient dans l'environnement virtuel en suivant les mêmes consignes que celles données en formation traditionnelle. La durée totale de formation et le temps de pratique pour chaque individu étaient identiques à la formation traditionnelle. La Figure 6-6 présente une illustration de la formation pratique dans VirTeaSy.

⁵¹ L'ensemble du matériel implantaire a été fourni par la société Astra. Nous les remercions de leur aide précieuse dans la réalisation de cette expérimentation.

⁵² Les implants fournis étaient des Tissue Level de la marque Astra. Leurs dimensions étaient de 4 millimètres de diamètre sur 10 millimètres de longueur.

Figure 6–6 : Illustration de la formation sur l'EVAH VirTeaSy



3.4.3) Description de la tâche de réinvestissement

La tâche de réinvestissement a consisté à poser un implant⁵³ unitaire dans le secteur mandibulaire de la mâchoire d'un cadavre humain. Dans l'objectif de se rapprocher le plus possible des conditions cliniques réelles avec un patient, la totalité de la tête a été conservée. Ceci a permis aux dentistes de retrouver les points d'appui anatomique utilisés dans leur pratique quotidienne.

Il a été demandé à tous les sujets de poser un implant dentaire en secteur mandibulaire en suivant les mêmes consignes que celles données en formation. Avant de débiter la tâche de réinvestissement, il a été rappelé aux sujets la séquence implantaire à respecter (ordre de passage des différents forets).

3.4.4) Données recueillies pour comparer les performances des sujets

Les performances des sujets dans la tâche de réinvestissement ont été mesurées à l'aide d'un scanner de type (EZ-Dicom CD Viewer)⁵⁴ en relevant trois mesures utilisées dans la littérature sur l'évaluation des poses d'implants (Ruppin et al., 2008 ; Ohtani et al., 2009) : l'angulation, l'émergence et la centration.

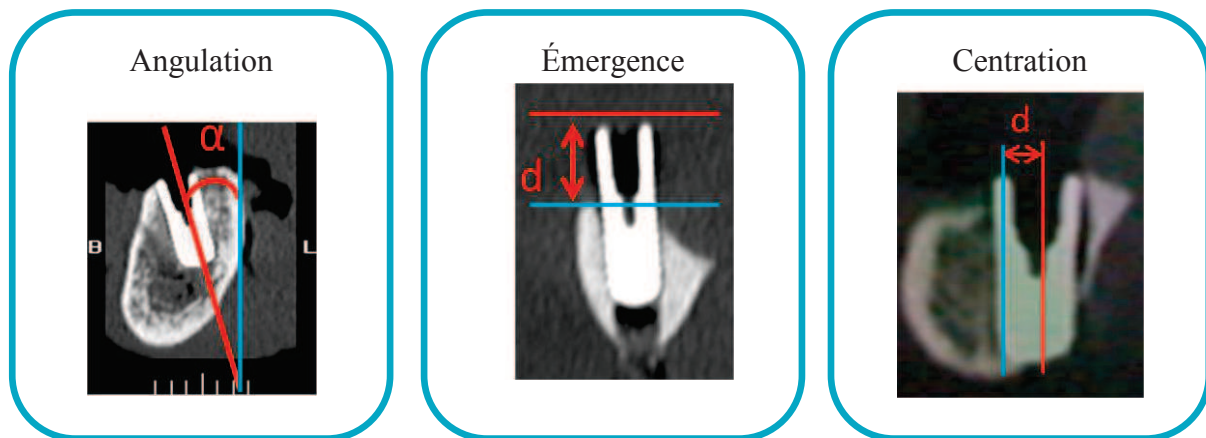
Pour évaluer l'angulation, nous avons mesuré sur le scanner l'écart en degrés par rapport à la verticale. Pour l'émergence, nous avons mesuré l'écart en millimètre entre le sommet de l'implant et celui de la crête osseuse. Pour la centration, nous avons mesuré l'écart en millimètre entre le centre de l'implant et le centre de la corticale osseuse. La Figure 6–7 illustre les mesures réalisées sur les scanners.

Sur les images, les traits bleus correspondent à la consigne (norme) et les traits rouges à la performance effectivement réalisée par le dentiste.

⁵³ Implant Bone Level de la marque Astra et de dimensions 4,1 millimètres de diamètre par dix millimètres de longueur.

⁵⁴ <http://www.mptronic.com/produits.htm> Visité le 7/06/11

Figure 6–7 : Mesures des performances sur scanner



3.4.5) Analyse des données

Afin de comparer les performances des sujets dans les trois groupes, nous avons réalisé une analyse de variance. L'analyse de variance est un test paramétrique permettant de déterminer si une ou plusieurs variables dites dépendantes sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes. Ce test suppose trois conditions : 1) que les groupes sont indépendants et tirés au hasard de leur population respective, 2) que les valeurs des populations soient normalement distribuées (même si l'analyse de variance n'est pas très sensible aux écarts de normalité) et enfin, 3) que les variances des populations soient égales.

Pour tester l'homogénéité des variances, nous avons utilisé le test de Levene avec un seuil de significativité à 10%. Pour comparer les moyennes de performances des trois groupes nous avons utilisé une analyse de variance à un facteur (ANOVA) avec un seuil de significativité à 5% (hypothèse 1). Nous avons réalisé une analyse de variance par mesure.

Si cette analyse de variance montre des différences significatives, nous testerons les moyennes deux à deux grâce à un test de Student (hypothèse 2) dans le but de déterminer si une formation particulière dégage des performances dans la tâche de réinvestissement significativement plus élevées.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SPSS.⁵⁵

3.5) Résultats

3.5.1) Données brutes

Le Tableau 6–7 présente les résultats bruts des trois mesures ainsi que les moyennes des trois groupes pour chacune d'elles.

⁵⁵ Nous tenons à remercier Monsieur Jaoud Alem pour ses conseils dans l'analyse statistique des données.

Tableau 6–7 : Données brutes des mesures en fonction des groupes

Sujet	Angulation (en°)			Émergence (en mm)			Centration (en mm)		
	RV	Tradi	Témoin	RV	Tradi	Témoin	RV	Tradi	Témoin
1	7	1	9	0,94	0,4	2,95	0,91	0,50	0,40
2	5	1	20	1,3	4,02	1,05	1,52	0,40	0,10
3	1	5	2	0	6,41	1,22	0	0,20	0,40
4	15	14	2	0,8	2,6	0,3	0,30	1,00	0,50
5	9	13	2	2,44	0,51	4,86	0,00	1,30	0,60
6	14	14	9	0,79	3,8	3,07	0,90	0,10	1,10
7	10	18	2	0,5	3,7	6,35	1,00	0,00	1,50
8	0	7	1	3,25	2,61	3,05	1,50	0,10	0,10
9	14	27	5	3,22	0,3	2,54	1,70	0,10	2,30
10	4	1	0	4,89	1	0,8	1,30	0,70	0,70
11	-	8	1	-	2,48	3	-	0,80	0,30
Moyenne	7,90	9,91	4,82	0,72	0,96	1,27	0,91	0,47	0,73

Les mesures sont des écarts à la norme (consigne donnée). Par conséquent plus le chiffre est important, moins la performance est élevée.

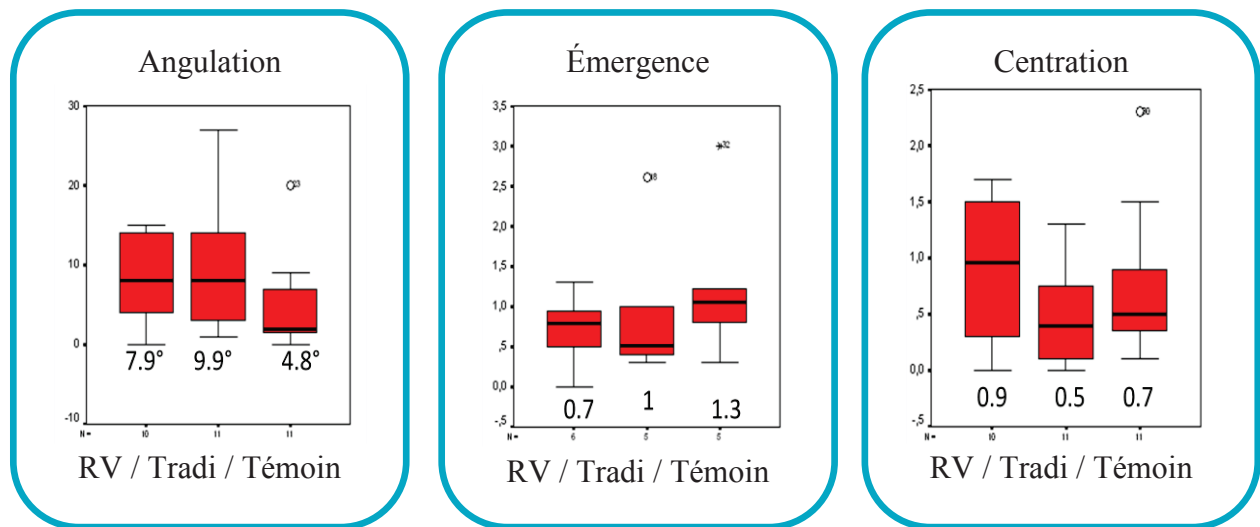
Pour l'angulation, le groupe GC a obtenu la meilleure performance avec un écart moyen à la consigne de 4.8°. Les groupes GRV et GT ont obtenu respectivement un écart moyen à la consigne de 7.9° et de 9.9°. Pour l'émergence, le groupe GRV a obtenu la meilleure performance avec un écart moyen à la consigne de 0.7 mm. Les groupes GT et GC ont obtenu respectivement un écart moyen à la consigne de 1 mm et de 1.3 mm. Enfin, pour la centration, le groupe GT a obtenu la meilleure performance avec un écart moyen à la consigne de 0.5 mm. Les groupes GRV et GC ont obtenu respectivement un écart moyen à la consigne de 0.9 mm et de 0.7 mm. C'est donc un groupe différent qui a obtenu la meilleure performance pour chaque des trois mesures retenues.

3.5.2) Analyse descriptive

La Figure 6–8 présente les « boîtes à moustaches⁵⁶ » des mesures de performances pour les trois variables en fonction des populations.

⁵⁶ La boîte à moustaches, une traduction de *Box & Whiskers Plot*, est une invention de TUKEY (1977) pour représenter schématiquement une distribution. Elle met en évidence un ou plusieurs paramètres de tendance centrale et un paramètre de dispersion ce qui permet d'appréhender visuellement l'ordre de grandeur d'une série ainsi que sa dispersion. Ce type de diagramme est principalement utilisé pour comparer un même caractère dans

Figure 6–8 « Boîtes à moustaches » mesures angulation, émergence et centration



L'analyse descriptive révèle que, pour les trois groupes et les trois mesures, la répartition des données est homogène, et que tous les intervalles se chevauchent.

3.5.3) Test d'homogénéité des variances (test de Levene)

Pour réaliser une analyse de variance, il faut une homogénéité des variances. Le test de Levene permet de tester cette homogénéité. Le Tableau 6–8 présente les résultats de ce test.

Tableau 6–8 : Résultat du test de Levene

	Statistique de Levene (k)	ddl1	ddl2	Signification
Angulation	1,306	2	29	,286
Émergence	,913	2	13	,426
Centration	,613	2	29	,548

Hypothèse H1 = les variances sont hétérogènes. Hypothèse H0 = les variances sont homogènes. Toutes les probabilités d'erreurs sont supérieures à 10% (angulation : $K(2,29) = 1.306$, $p = \text{n.s.}$; émergence : $K(2,13) = .913$, $p = \text{n.s.}$; centration : $K(2,29) = .613$, $p = \text{n.s.}$).

des populations différentes. Ces boîtes comprennent le plus souvent : 1) une échelle des valeurs présente sur l'axe vertical ; 2) la valeur du premier quartile (Q1) qui est le trait inférieur de la boîte ; 3) la valeur du troisième quartile (Q3) qui est le trait supérieur de la boîte ; 4) la valeur de second quartile (Q2 qui est la médiane) représentée par un trait horizontal au sein de la boîte. 5) les moustaches inférieure et supérieure représentées par des petits rectangles verticaux de chaque côté de la boîte ; 6) les valeurs maximum et minimum sont représentées par un cercle.

Nous pouvons considérer que le test de Levene n'est pas significatif et donc que les variances sont égales. Ce résultat nous permet d'utiliser pour la suite une analyse de variance à un facteur.

3.5.4) Comparaison des moyennes (analyse de variance à un facteur)

Nos hypothèses expérimentales et statistiques sont respectivement, H1 : les trois moyennes des trois groupes sont différentes ; H0 : les trois moyennes des trois groupes sont égales.

Pour l'angulation (Tableau 6–9), nous n'avons pas observé d'effet significatif de la formation, $F(2,29)=1.625$, $p = \text{n.s.}$

Tableau 6–9 : Résultat de l'analyse de variance pour l'angulation

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Angulation	Inter-groupes	144,522	2	72,262	1,625	,214
	Intra-groupes	1289,445	29	44,464		
	Total	1433,969	31			

Pour l'émergence (Tableau 6–10), nous n'avons pas observé d'effet significatif de la formation⁵⁷, $F(2,13)=.612$, $p = \text{n.s.}$

Tableau 6–10 : Résultat de l'analyse de variance pour l'émergence

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Emergence	Inter-groupes	,832	2	,416	,612	,557
	Intra-groupes	8,844	13	,680		
	Total	9,676	15			

Pour la centration (Tableau 6–11), nous n'avons pas observé d'effet significatif de la formation, $F(2,29)=1.518$, $p = \text{n.s.}$

⁵⁷ 16 sujets ont posé un implant sur une mâchoire ne présentant pas une hauteur inférieure à la longueur de l'implant à poser. Les données pour ces sujets concernant l'émergence ont été retirés de l'analyse.

Tableau 6–11 : Résultat de l'analyse de variance pour la centration

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Centration	Inter-groupes	1,030	2	,515	1,518	,236
	Intra-groupes	9,836	29	,339		
	Total	,10,866	31			

Ces résultats n'indiquent pas de différences significatives entre les groupes sur l'ensemble des variables testées⁵⁸.

3.6) Discussion

Cette étude disposait deux hypothèses initiales. La première était que les sujets ayant suivi une formation (traditionnelle ou virtuelle) aient des performances significativement supérieures aux sujets n'ayant pas eu de formation (groupe contrôle). La seconde était que les performances des sujets ayant suivi une formation virtuelle étaient supérieures ou égales aux performances des sujets ayant suivi une formation traditionnelle.

Nos résultats ne confirment pas nos deux hypothèses initiales. Ils indiquent qu'aucune des deux formations à l'implantologie ne provoque une amélioration significative des performances des sujets dans la tâche de réinvestissement. Nous discuterons ces résultats selon trois angles : les limites du protocole expérimental, le contenu de la formation traditionnelle à l'implantologie du DU de Brest, et le contenu d'une formation à l'implantologie utilisant un EVAH.

3.6.1) Les limites du protocole

Nos résultats peuvent s'expliquer en partie par le choix de notre protocole. Trois éléments sont discutés ci-dessous : le temps de pratique effectif en formation, la tâche retenue, et l'état de développement de l'EVAH.

Tout d'abord, il nous semble nécessaire d'interroger les deux heures de pratique dont les sujets ont bénéficié en formation avant de passer sur la tâche de réinvestissement. Ce temps peut être considéré comme tout à fait insuffisant pour maîtriser une habileté motrice. En effet comme le soulignent Schmidt, Younga, Swinnena, Shapiroa, (1989), il faut plusieurs dizaines voir centaines d'heures pour maîtriser une habileté motrice. Dans ces conditions deux

⁵⁸ Au regard du nombre de sujets, des tests statistiques de type paramétriques et non-paramétriques ont été performés. Les résultats n'ont pas été significatifs dans les deux cas. Nous avons conservé les tests statistiques paramétriques pour la présentation dans le texte.

heures de pratique peuvent paraître tout à fait insuffisantes. Pour autant, les sujets de cette expérience sont des praticiens diplômés. Ils maîtrisent donc les habiletés motrices de base à l'exercice du métier de dentiste. Par conséquent, l'objectif de la formation est de spécifier ces habiletés dans le contexte de l'implantologie dentaire. Dans ce cas, deux heures de pratique n'ont pas paru initialement comme un temps insuffisant pour viser cet objectif. Les résultats de notre étude conduisent cependant à s'interroger sur ce temps de pratique pour adapter des habiletés de dentiste à l'exercice de l'implantologie. Cette question du temps de pratique nécessaire pour adapter une habileté motrice maîtrisée à un nouveau contexte reste en discussion à la suite de notre étude. Des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer le temps de pratique nécessaire à l'atteinte de cet objectif.

Ensuite, la législation n'impose pas aux dentistes en exercice de disposer d'une formation et/ou d'un diplôme spécifique pour exercer l'implantologie dentaire. Cette disposition institutionnelle laisse à penser que les actes simples d'implantologie ne requièrent pas l'apprentissage de nouvelles habiletés motrices pour un dentiste expérimenté. Notre étude a retenu une tâche de réinvestissement consistant à poser un implant dentaire unitaire en secteur molaire mandibulaire. Cette tâche est considérée dans la profession comme le cas le plus simple de l'implantologie dentaire. En retenant une tâche simple, notre étude ne s'est pas révélée en mesure de discriminer les habiletés motrices des sujets des trois groupes. Par conséquent, pour les futures études, il serait judicieux de proposer aux sujets une tâche de réinvestissement nécessitant de mobiliser des habiletés motrices plus complexes afin d'augmenter la capacité de discrimination de la tâche.

Enfin, cette étude a porté sur un EVAH non finalisé. En effet, au moment de la disponibilité de sujets pour participer à notre étude, l'EVAH ne disposait pas, par exemple, de la finesse du retour d'effort dont il fait preuve aujourd'hui. Les sujets expérimentés ont pu éprouver des difficultés pour retrouver des sensations qu'ils ont l'habitude de ressentir lors d'interventions dentaires. De même, l'étude préalable d'analyse de l'activité de chirurgiens-dentistes experts était en cours. Par conséquent, l'EVAH ne disposait pas à ce moment de l'ensemble des aides et fonctionnalités décrites dans le chapitre 5 et aujourd'hui implémentées dans VirTeaSy. Or celles-ci auraient pu contribuer à l'amélioration des performances des sujets du groupe réalité virtuelle. C'est pourquoi nous parlons d'une étude préliminaire de VirTeaSy.

3.6.2) Contenu de la formation traditionnelle

La formation traditionnelle pratiquée dans notre expérience fait le postulat que réaliser des exercices de pose d'implants sur des mâchoires en plastique permet de développer les habiletés motrices des sujets et de les transférer en situation réelle. Nous n'avons pas discuté ce postulat initial. Cependant, nos résultats ont révélé que les sujets formés cette manière n'ont pas présenté de performances significativement supérieures aux sujets n'ayant pas suivi de formation (groupe témoin). Ces résultats invitent donc à discuter le contenu de cette formation traditionnelle.

Comme nous l'avons vu au début de cette partie, la formation traditionnelle mobilise un transfert vertical, proche, spécifique et par voie basse. Dans ce type de formation, les dentistes répètent des gestes dans des conditions identiques et standardisées, mémorisent des indicateurs de réussite et apprennent à réaliser une succession d'étapes en utilisant le matériel implantaire. De cette manière, les dentistes apprennent le protocole implantaire ce qui s'apparente à l'apprentissage d'une procédure.

Or, lors de la tâche de réinvestissement, chaque tête de cadavre disposait d'un profil anatomique différent (densité osseuse, largeur et hauteur d'os, forme et angulation des dents adjacentes), ce qui a conduit les sujets à adapter la procédure apprise en formation en fonction de l'anatomie de la tête de cadavre sur laquelle ils devaient poser l'implant. Nos sujets se sont donc retrouvés dans la situation, non de transposer un apprentissage d'une tâche d'apprentissage à une tâche de réinvestissement de même nature comme nous l'envisagions préalablement, mais dans celle de s'adapter à une nouvelle situation en fonction de la structure anatomique rencontrée.

Par conséquent, il existe un écart important entre l'apprentissage visé en formation traditionnelle (une procédure) et l'apprentissage à mobiliser dans la tâche de réinvestissement (adapter la procédure au cas clinique). Et cet écart est dû en grande partie à l'utilisation des mâchoires en plastique qui ne permettent pas de retranscrire la diversité des situations rencontrées dans le réel.

Cette conclusion est en accord avec notre analyse de l'activité (détaillée dans le chapitre 4 et dont les résultats n'étaient pas connus lors de la réalisation de cette étude) qui révèle que l'implantologie consiste, non pas à mettre en œuvre une procédure, mais plutôt à adapter une procédure à chaque cas clinique.

Finalement dans cette étude, nos sujets ont réalisé une formation traditionnelle basée sur un type de transfert vertical, proche, spécifique et par voie basse ; alors que la tâche de réinvestissement orientait les sujets à mobiliser un transfert de type horizontal, lointain et par voie haute. Nos résultats pourraient donc s'expliquer par ce décalage entre la formation suivie par les sujets et les demandes de la tâche de réinvestissement. Ces résultats discutent le contenu de la formation pratique traditionnelle⁵⁹ et ouvre la voie à des alternatives.

Remarque : dans le point précédent, nous avons émis l'hypothèse que la tâche de réinvestissement n'était pas assez complexe en terme d'habileté motrice pour discriminer les sujets. Dans cette partie, nous ne réfutons pas cette hypothèse mais nous la complétons. En, effet, nous pensons que la tâche de réinvestissement s'est révélée extrêmement complexe dans sa dimension d'adaptation à des structures anatomiques du vivant. Ainsi la tâche de

⁵⁹ Notons qu'afin d'offrir une formation d'un haut niveau de qualité, les DU d'implantologie français surmontent cette difficulté en permettant à leurs étudiants accédant à la deuxième année du DU (environ 25% de la promotion) de se former via le compagnonnage. Ce type de formation permet aux apprenants de réaliser plusieurs prises en charge complètes (de la phase de planification à la pose de prothèse dentaire) de patients réelles sous la direction d'un dentiste expert, dans le but de se confronter à la diversité des cas cliniques. La première année du DU est donc une année de sélection basée essentiellement sur des apports théoriques permettant de sélectionner les étudiants qui pourront passer à la pratique sur de réels patients.

réinvestissement aurait été trop simple d'un point de vue habiletés motrices mais trop complexe d'un point de vue cognitif.

3.6.3) Les objectifs d'un EVAH en implantologie dentaire

La formation traditionnelle s'est donc révélée limitée lorsque les sujets se retrouvaient dans la tâche de réinvestissement proche du réel. Or, en rapport avec les protocoles expérimentaux mobilisés dans la littérature sur le transfert des apprentissages, nous avons décalqué la formation traditionnelle dans VirTeaSy en termes de contenu et de temps de formation. Dans ces conditions, il nous a semblé cohérent que les résultats de l'étude n'indiquent pas de différences significatives entre groupe formation réalité virtuelle et le groupe formation traditionnelle dans la mesure où les sujets ont été placés dans le même contexte d'expérimentation.

Notre étude invite donc à revisiter ce type de protocole comparant des formations identiques. En effet, en décalquant une formation traditionnelle dans un EVAH, on n'utilise pas le potentiel des technologies de la réalité virtuelle décrites par exemple dans le chapitre 5.

Dans ce cadre, mener une étude du transfert des apprentissages en comparant des formations traditionnelles et des formations en réalité virtuelle ne devrait pas reposer sur des formations parfaitement identiques mais sur la mobilisation du potentiel des technologies de la réalité virtuelle à former des individus dans le même volume horaire, mais par des formations originales⁶⁰. Ceci nous invite à nous interroger sur les contenus d'une formation par la réalité virtuelle.

La question est donc de savoir quel contenu proposer dans une formation à l'implantologie dentaire sur un EVAH. Nous avons vu que le transfert de la tâche de formation à la tâche de réinvestissement était horizontal, lointain et par voie haute. Dans ces conditions, la conception d'une formation dans un EVAH devrait répondre à ce type de transfert et permettre de faire ressortir les connaissances nécessaires à la résolution d'un problème dans une nouvelle tâche (transfert horizontal). Ce type de connaissance renvoie, selon nous, aux concepts organisateurs de l'activité décrit dans le chapitre 3 car c'est grâce à eux que le sujet pourra diagnostiquer la situation et y répondre de manière adéquate. Ces concepts organisateurs et la structure conceptuelle de la situation seront mis en exergue grâce à des évaluations (pendant et après la chirurgie) et à des séances de débriefing. De plus, ils permettront au sujet d'adapter ses connaissances et habiletés motrices acquises précédemment pour guider son action dans des situations évolutives et changeantes (transfert lointain, Misko, 1999). Enfin, l'utilisation de situations décontextualisées comme des ateliers ainsi que la pratique dans une variété de situations différentes permettront de favoriser le transfert par voie haute.

⁶⁰ Par exemple, si la formation traditionnelle dure dix heures alors la formation en réalité virtuelle devra également durer dix heures, mais elle devra disposer d'un contenu adapté à la réalité virtuelle et créé conjointement par des spécialistes de la formation en réalité virtuelle et par des enseignants du domaine.

Par conséquent, la formation sur EVAH devra permettre d'identifier la structure conceptuelle de la situation, de pratiquer dans des situations diverses, variées, et parfois décontextualisées. Les prochaines évaluations de VirTeaSy devront donc intégrer ces dimensions ainsi que la phase de planification pour espérer obtenir un transfert positif de la tâche d'apprentissage à la tâche de réinvestissement proche du réel. Or, la version finale de VirTeaSy (chapitre 5) permet justement d'intégrer ce type de contenu.

3.6.4) Perspectives d'évaluation de VirTeaSy

Finalement, si l'obtention d'un transfert positif entre la tâche de formation et la tâche de réinvestissement semble difficile à obtenir en utilisant uniquement des mâchoires en plastique, nous pensons que cela est possible grâce à l'utilisation de VirTeaSy et essayerons de le démontrer à travers de nouvelles expérimentations. Par conséquent, en tenant compte des différents éléments avancés dans cette discussion, nous envisageons plusieurs perspectives à notre étude.

La première consiste à s'assurer des apprentissages construits par les sujets dans VirTeaSy. Pour ce faire, nous pourrions comparer dans l'EVAH les performances des sujets après un certain nombre de répétitions dans une tâche d'apprentissage. Ce type d'étude (cf. Blavier et al., 2007) permet d'obtenir une courbe d'apprentissage indiquant le temps nécessaire pour apprendre une procédure (enchaînement d'actions) dans l'EVAH.

Un second type d'expérimentation consiste à s'assurer de la construction de la structure conceptuelle de la situation par les sujets dans VirTeaSy. Pour ce faire, nous pourrions évaluer des sujets lors d'un test pré-formation puis lors d'un test post-formation sur VirTeaSy (Suebnuarn et al., 2010). L'objectif de cette étude serait d'identifier l'évolution des stratégies mises en œuvre par les sujets entre le pré et le post-test.

Enfin, un troisième type d'expérimentation serait d'étudier à nouveau le transfert du virtuel au réel en contournant les limites rencontrées dans la présente étude. Pour ce faire, nous souhaitons conserver la tâche de réinvestissement proche de la situation réelle (cadavre) et l'équivalence en termes de volume horaire entre les différentes formations. Par contre, nous souhaitons : 1) augmenter la durée de la formation en fonction des résultats des futures expérimentations citées ci-dessus ; 2) choisir une tâche plus complexe en terme d'habiletés motrices pour s'assurer qu'elle puisse discriminer les sujets ; 3) disposer de la version finale de VirTeaSy comprenant la planification et l'ensemble des éléments permettant la conceptualisation dans l'action (chapitre 5) ; 4) comparer quatre groupes : un groupe témoin, un groupe formation traditionnelle, un groupe formation sur EVAH, et un groupe mixte utilisant à la fois les mâchoires plastiques et à la fois l'EVAH ; 5) être libre dans la conception de la formation sur EVAH et de la formation mixte. Une telle expérimentation intégrant l'ensemble de ces remarques devraient nous permettre de montrer qu'il est possible de transférer des apprentissages du virtuel au réel dans le domaine de l'implantologie et ainsi de permettre à des dentistes de devenir compétent en situation réelle grâce à une formation sur EVAH.

4) Conclusion du chapitre

L'objectif du chapitre 6 était d'évaluer l'EVAH développé. Cette évaluation a été conduite dans le cadre du projet « Formarev » labellisé par le « Pôle images & réseaux ». Au moment de la réalisation de ce projet, notre EVAH VirTeaSy ne disposait pas de l'intégralité des fonctionnalités développées dans le chapitre 5. Par conséquent, l'évaluation a porté uniquement sur l'apprentissage d'un geste chirurgical grâce à un bras à retour d'effort.

Ce chapitre était organisé en deux parties. La première partie était consacrée à une revue de littérature des approches et outils utilisés pour évaluer les EVAH du domaine dentaire intégrant une interface haptique pour apprendre une ou des habiletés motrices. Nous avons recensé cinq catégories d'évaluation. La première repose sur des questionnaires de satisfaction et a montré que les experts et étudiants du domaine dentaire utilisant ces dispositifs se disent satisfaits de leur utilisation et y trouvent un intérêt pour la formation. La seconde, mobilisant une comparaison entre des experts et des novices, a montré que les experts obtiennent de meilleures performances que les novices dans l'EVAH. Ils réalisent plus vite les tâches demandées et appliquent de manière plus appropriée que les novices les forces sur les structures anatomiques. La troisième, basée sur la comparaison de performances avant et après une formation, a montré qu'il était possible d'apprendre une habileté motrice grâce à un EVAH à interface haptique. La quatrième, mobilisant une comparaison entre une formation traditionnelle et une formation par la réalité virtuelle, a montré que les étudiants formés par des dispositifs de réalité virtuelle obtiennent un niveau de performance équivalent à des étudiants formés de manière traditionnelle mais avec un temps de pratique inférieur et en sollicitant moins d'interactions avec le professeur. Enfin, la cinquième catégorie d'évaluation, basée sur le transfert d'apprentissage du virtuel au réel, a montré que certaines dimensions de l'apprentissage en réalité virtuelle apparaissent transférables à une situation réelle de pratique.

La seconde partie du chapitre était consacrée à l'évaluation de VirTeaSy. L'objectif final de notre EVAH étant de permettre à des dentistes d'être compétents en situation réelle, notre étude s'est donc inscrite dans le paradigme des évaluations basées sur le transfert. Le transfert d'apprentissage est défini par Pennington et al. (1995) comme la capacité à utiliser en environnement de travail des connaissances, aptitudes et attitudes apprises en environnement de formation. Les résultats des études sur le transfert sont parfois positifs parfois négatifs mais toutes s'accordent sur l'utilisation d'un protocole comparant les performances d'un groupe recevant une formation traditionnelle à celle d'un groupe formé en réalité virtuelle. L'objectif de notre étude était double, nous voulions d'une part montrer l'intérêt d'une formation en réalité virtuelle par rapport à une formation traditionnelle ; et d'autre part démontrer que les apprentissages réalisés dans VirTeaSy peuvent être réutilisés en situation réelle. Pour ce faire, trente deux dentistes dont vingt femmes et douze hommes ont été répartis de façon aléatoire dans trois groupes : un groupe (n=10) nommé GRV formé dans VirTeaSy, un groupe (n=11) nommé GT formé de manière traditionnelle et un groupe (n=11) nommé contrôle (GC) ne recevant aucune formation. Tous les sujets étaient novices en implantologie dentaire. Une semaine après que chaque groupe ait suivi sa formation, tous les sujets ont réalisé la tâche de réinvestissement qui consistait à poser un implant sur un cadavre

humain. Pour chaque sujet, nous avons mesuré, à l'aide d'un scanner, la différence entre la performance demandée et la performance réalisée. Les mesures portaient sur l'angulation, l'émergence et la centration. Nos résultats n'ont pas montré de différence significative entre les trois groupes. Ainsi, aucune des deux formations à l'implantologie ne provoquent une amélioration significative des performances des sujets dans la tâche de réinvestissement. Nous avons discuté ces résultats selon trois angles : les limites du protocole expérimental, le contenu de la formation traditionnelle à l'implantologie du DU de Brest, et le contenu d'une formation à l'implantologie utilisant un EVAH. Enfin, en perspectives, nous avons proposé trois études complémentaires pour démontrer l'intérêt de l'EVAH VirTeaSy dans la formation des chirurgiens-dentistes à l'implantologie.

Le prochain chapitre est la conclusion de la générale. Nous y discuterons l'ensemble des résultats de la thèse et proposerons des perspectives à court et moyen terme.

7e chapitre : Conclusion générale

L'émergence de technologies de réalité virtuelle permet aujourd'hui la conception d'EVAH pertinents pour être utilisés dans le cadre de formations. Cependant, nous pensons que ces EVAH serviront l'apprentissage s'ils sont conçus sur la base de méthodologie incluant les sciences humaines afin notamment d'identifier précisément les apprentissages à acquérir. Les travaux que nous avons menés en collaboration avec des experts métiers et des chercheurs en sciences de l'informatique suivent cette ligne directrice.

Au terme de cette thèse CIFRE réalisée en partenariat avec la société Didhaptic, nous souhaitons revenir sur les différentes phases de notre travail : analyse de l'activité, conception et évaluation de l'EVAH VirTeaSy. Nous trouverons ainsi l'occasion de rappeler nos choix théoriques, les principes méthodologiques, ainsi que les principaux résultats obtenus. Nous discuterons également des apports et des limites de nos propositions afin d'envisager quelques axes prospectifs. Enfin, nous expliciterons les liens entre les recherches menées ou à mener et le monde de l'industrie.

Ainsi, ce dernier chapitre s'organise en trois points : la didactique professionnelle pour analyser l'activité ; la conception d'EVAH : du spécifique au générique ; l'évaluation de VirTeaSy et ses perspectives.

1) La didactique professionnelle pour analyser l'activité

Pour identifier les apprentissages à inclure dans l'EVAH, nous avons choisi de mener une analyse de l'activité mobilisant le cadre théorique de la didactique professionnelle. Celle-ci se finalise par l'identification de la structure conceptuelle de la situation reposant sur des concepts organisateurs de l'activité en liens avec des variables et des indicateurs (chapitre 3). Notre première étude (chapitre 4) s'est ainsi attachée à identifier la structure conceptuelle de la situation en implantologie dentaire. Au cours de situations réelles de pose d'implant dentaire, des données d'enregistrement ont été recueillies et complétées par des verbalisations obtenues lors d'entretiens d'auto-confrontation. L'analyse des données à l'aide de la méthodologie des catégories conceptualisantes nous a permis de faire émerger les concepts organisant l'activité des dix chirurgiens-dentistes observés. Nos résultats montrent que l'activité d'implantologie consiste à réaliser un compromis entre le concept organisateur « d'émergence » qui permet de réaliser le projet prothétique et le concept « d'ancrage » qui permet au projet prothétique de durer dans le temps. Ces deux concepts n'étant pas toujours convergents.

Dans cette partie de la conclusion générale, nous souhaitons discuter deux aspects de notre première étude : le métier analysé au regard du cadre théorique mobilisé, et la validité de l'étude par rapport à la diffusion de VirTeaSy.

Tout d'abord, nous souhaitons discuter le champ d'application et plus précisément le métier analysé lors de cette étude au vu de notre cadre théorique. En effet, les principaux travaux ayant mobilisé la didactique professionnelle ont analysé des métiers aux caractéristiques communes : les sujets ont un faible niveau d'étude, et la finesse des habiletés motrices n'est pas prise en compte. Or, pour les besoins de VirTeaSy, notre analyse portait sur des professionnelles à haut niveau d'étude et sur un métier où la composante habileté motrice est extrêmement importante. Il était donc légitime d'avoir des craintes sur la capacité de ce cadre théorique à identifier les compétences cibles dans de telles conditions.

Nos résultats ont montré que ces craintes n'étaient pas fondées et que le cadre théorique de la didactique professionnelle était parfaitement adapté pour identifier les compétences à transmettre, peu importe le métier cible. Cette thèse vient donc compléter les résultats des études de Pastré sur les ingénieurs de la centrale nucléaire et réaffirmer le caractère transversal de la didactique professionnelle.

Ensuite, nous souhaitons aborder, dans cette partie sur la didactique professionnelle, la validité de notre étude par rapport à la diffusion de VirTeaSy. En effet, notre revue de littérature (chapitre 2) a montré que la majorité des EVAH développés dans le domaine dentaire était spécifique à la faculté porteuse du projet. Ainsi, les EVAH développés ne correspondaient pas forcément aux attentes des autres universités et des formations privées. Or d'un point de vue commercial, l'objectif de VirTeaSy est de correspondre à la fois à l'ensemble des universités et à la fois aux formations privées.

Le choix de la didactique professionnelle et de sa méthodologie, nous a permis de dépasser ce problème de spécificité en mobilisant des chirurgiens-dentistes issus d'horizons différents. Ainsi, bien que tous les sujets soient experts en implantologie, ils ont tous un parcours différents : type de formation à l'implantologie, université initiale, activité professionnelle (enseignant VS profession libérale), âge, sexe, latéralité. C'est donc la confrontation à cette diversité/variété de praticiens qui nous a permis de concevoir VirTeaSy, c'est-à-dire un EVAH capable de s'adapter et de répondre aux besoins et attentes du plus grand nombre.

Toutefois, l'analyse menée étant franco-française, elle nécessite d'être complétée par une étude internationale pour identifier les similitudes et les différences en termes de pratique et d'enseignement afin de permettre une diffusion internationale de VirTeaSy. Dans cette optique, un partenariat avec l'université d'Harvard et l'université de Genève débutera en janvier 2012.

2) La conception d'EVAH : du spécifique au générique

La conception de VirTeaSy s'est appuyée sur les résultats de l'étude 1. En effet, l'objectif de notre EVAH est de permettre aux apprenants de construire la structure conceptuelle de la situation et de faire des liens entre les concepts, variables et indicateurs, afin de gérer les conflits auxquels ils sont confrontés en situation réelle. Pour ce faire, nous avons mis en place une méthodologie en cinq étapes qui a permis de définir : le type d'EVAH à concevoir et ses caractéristiques « hardware », l'environnement virtuel et les situations d'apprentissage, l'enrichissement des situations d'apprentissage grâce à la réalité virtuelle, la gestion de la complexité dans l'EVAH, et l'intégration de l'EVAH à un dispositif global de formation. Notre expérience de cette mise en œuvre méthodologique montre qu'il faut constamment faire des choix. Ces choix reposent dans un premier temps sur la littérature et conduisent à définir des éléments de conception généraux. Ces éléments sont ensuite spécifiés à l'aide des résultats de l'analyse de l'activité, celle-ci prend alors toute sa pertinence afin que l'EVAH traduise les compétences-clefs que les apprenants doivent construire pour être efficaces.

Dans cette partie, nous souhaitons revenir sur cette première expérience en conception d'EVAH et proposer de nouvelles perspectives.

La conception de VirTeaSy s'est déroulée de manière spécifique, c'est-à-dire que la méthodologie détaillée dans le chapitre 5 s'est construite au fur et à mesure de la thèse par des mécanismes d'expérimentation et d'essais-erreurs. Ainsi, au début de ce travail de recherche, nous ne savions pas quelle méthodologie nous allions mettre en œuvre. Ce type de processus est extrêmement coûteux en temps et de nombreux retours en arrière ont dû être réalisés. De plus, pour implémenter les applications pédagogiques de VirTeaSy, la société Didhaptic a développé ses propres programmes de manière spécifique au domaine dentaire, c'est-à-dire qu'ils ne seront pas directement réutilisables lors de la conception de nouveaux EVAH dans d'autres domaines. Enfin, bien que les sciences humaines aient été intégrées dès le début du processus, c'est un informaticien qui a piloté le développement de l'EVAH. En effet, les spécialistes des sciences humaines ne pouvant exprimer leurs compétences et les résultats de leurs études directement dans l'EVAH, l'informaticien reste la personne centrale du processus de conception et même d'évolution de l'EVAH.

Aujourd'hui, nous avons une vision globale d'un processus de conception d'EVAH et disposons d'informations supplémentaires non détaillées dans cette thèse comme les modes de fonctionnement entre personnes de disciplines différentes, les informations nécessaires à chaque acteur du processus de conception, les délais de réalisations pour chaque partie de la méthodologie, etc. Par conséquent, forte de ces informations, la perspective industrielle de la société Didhaptic sera de formaliser une méthodologie générique de conception d'EVAH, c'est-à-dire adaptable à tout type d'EVAH et à tout type de métier. L'objectif de cette perspective est double : 1) replacer au centre de la conception d'EVAH les spécialistes de la formation en leur donnant les moyens d'exprimer directement leurs compétences et, 2) rationaliser le processus de développement en le rendant le plus économique possible.

Cette perspective est sur le point de se concrétiser à travers le projet « GénéEVF » qui répond à l'appel d'offre PME du Pôle Images & Réseaux. Concrètement, l'objectif est de développer, expérimenter et évaluer une plate-forme générique de réalité virtuelle permettant de concevoir des EVAH. Cette plate-forme nommée MASCARET et basée sur la méta-modélisation sera associée à des outils auteurs génériques et intuitifs (suite logicielle), pour permettre aux spécialistes de la formation de piloter le processus de conception. Pour finir, notons que ce vaste projet sera l'occasion de mener de nouveaux travaux de recherches sur la thématique du passage de la modélisation d'une analyse de l'activité à l'utilisation directe des résultats pour la conception des aspects pédagogiques d'un EVAH.

3) L'évaluation de VirTeaSy et ses perspectives

Idéalement, l'étude 2 (chapitre 6) aurait dû évaluer la capacité de VirTeaSy à permettre aux apprenants de construire la structure conceptuelle de la situation. Cependant, l'étude d'évaluation s'est déroulée dans le cadre du projet « Formarev » dont les échéances ont contraint la période d'expérimentation. Ainsi, nous avons mobilisé pour cette étude une version Beta de VirTeaSy n'intégrant pas l'ensemble des fonctionnalités déduites de l'analyse de l'activité. L'étude réalisée a porté sur l'apprentissage d'un geste chirurgical grâce à un EVAH basé sur une interaction « haptique » et sur son transfert du virtuel au réel. Plus précisément, cette expérimentation s'est attachée à montrer l'intérêt d'une formation en réalité virtuelle en comparaison avec une formation traditionnelle ou une absence de formation. Pour ce faire, trente-deux dentistes ont été répartis de façon aléatoire dans trois groupes : un groupe (n=10) nommé GRV formé dans VirTeaSy, un groupe (n=11) nommé GT formé de manière traditionnelle et un groupe (n=11) nommé contrôle (GC) ne recevant aucune formation. Tous les sujets étaient novices en implantologie dentaire. Une semaine après que chaque groupe ait suivi sa formation, tous les sujets ont réalisé la tâche de réinvestissement consistant à poser un implant sur un cadavre humain. Pour chaque sujet, nous avons mesuré, à l'aide d'un scanner, la différence entre la performance demandée et la performance réalisée. Les mesures portent sur l'angulation, l'émergence et la centration. Nos résultats n'ont pas montré de différence significative entre les trois groupes. Aucune des deux formations à l'implantologie n'a provoqué, dans les conditions de l'expérimentation, une amélioration significative des performances des sujets dans la tâche de réinvestissement. Pour finir, notons que si l'évaluation de VirTeaSy n'a pas produit les résultats que nous attendions, elle fut extrêmement riche et pertinente du point de vue de la réflexion à mener sur la construction et le contenu d'une formation utilisant les technologies de la réalité virtuelle.

À travers cette deuxième étude, nous souhaitons nous interroger sur trois aspects : L'objectif initial de la thèse est-il atteint ? Si la réponse est non, quelles sont les études à réaliser pour atteindre l'objectif initial ? Et plus généralement, quelles sont les perspectives pour VirTeaSy ?

Tout d'abord, l'objectif de cette thèse était d'aider la société Didhaptic à concevoir un EVAH permettant à des dentistes diplômés d'apprendre à poser des implants dentaires pour

qu'ils soient compétents en situation réelle. Or, comme nous venons de le voir, l'évaluation de VirTeaSy n'a pas porté sur le transfert de compétences en situation réelle mais sur le transfert d'une habileté motrice du virtuel au réel. Par conséquent, dans l'état actuel de nos travaux, nous ne pouvons pas répondre à la question initialement posée. C'est pourquoi nous devons poursuivre l'évaluation de VirTeaSy à travers d'autres expérimentations.

Ensuite, comme nous l'avons indiqué dans la discussion du chapitre 6, les prochaines évaluations de VirTeaSy devront évaluer la capacité de notre EVAH à permettre aux apprenants de construire la structure conceptuelle de la situation et de la transférer en situation réelle. Une condition indispensable pour y parvenir sera de disposer de la version finale de VirTeaSy. Notons que la société Didhaptic débutera en 2012 des partenariats avec trois universités (la faculté de Garancière, Paris, France ; la faculté de Genève, Suisse ; la faculté d'Harvard, Etats-Unis) afin de disposer d'étudiants en dentaire pour réaliser les protocoles d'évaluations.

Enfin, la dernière perspective liée à VirTeaSy concerne son périmètre de formation. Actuellement, notre EVAH propose une solution de formation spécifique à l'implantologie et dédiée à des praticiens diplômés. Notre objectif sera donc d'élargir ce périmètre de formation en ajoutant du contenu pédagogique lié à la dentisterie classique, tout en conservant la même architecture « hardware ». Cet élargissement permettra à VirTeaSy d'accéder au marché de la formation des étudiants en dentaire dès la deuxième année universitaire. Un partenariat avec la faculté dentaire de Brest a ainsi débuté pour réaliser des nouvelles études d'analyse d'activité sur les travaux pratiques en odontologie conservatrice et en prothèse conjointe afin de définir les tâches à réaliser et l'activité d'étudiants en formation et d'experts du domaine lors de ce type d'exercice.

Références bibliographiques

Alessi, S. (1988). Fidelity in the design of instructional simulations. *Journal of Computer-Based Instruction*, 15(2):40–47.

Analoui, F. (1993). *Training and transfer of learning*. Aldershot: Avebury.

Anderson, J., Reder, L., and Simon, H. (1996). Situated learning and education. *Educational Researcher*, 25(4):5–11.

Batteau, L., Liu, A., Maintz, J., Bhasin, Y., and Bowyer, M. (2004). A study on the perception of haptics in surgical simulation. In Cotin, S. and Metaxas, D., editors, *Medical Simulation*, volume 3078 of *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 185–192). Springer Berlin / Heidelberg.

Blavier, A., Gaudissart, Q., Cadière, G.-B., and Nyssen, A.-S. (2007). Perceptual and instrumental impacts of robotic laparoscopy on surgical performance. *Surgical endoscopy*, 21(10):1875–1882.

Bliss, J., Tidwell, P., and Guest, M. (1997). The effectiveness of virtual reality for administering spatial navigation training to firefighters. *Presence*, 6:73–86.

Bossard, C., Kermarrec, G., Bénard, R., De Loor, P., and Tisseau, J. (2009). Sport, réalité virtuelle et simulations participatives : Illustration dans le domaine du football avec le simulateur copefoot. *Intellectica*, 52:97–117.

Bracke, D. (1998). *Vers un modèle théorique du transfert. Le rôle des affordances, des catégories et des modèles mentaux*. PhD thesis, Université de Montréal.

Bricken, W. (1991). Training in virtual reality. In *Proceedings of the 1st International Conference on Virtual Reality* (pp. 46–48). London.

Brooks, B., McNeil, J. and Rose, F., Greenwood, R., Atree, E., and Leadbetter, A. (1999). Route learning in a case of amnesia: the efficacy of training in a virtual environment. *Neuropsychological Rehabilitation*, 9:63–76.

Brown, A., Bransford, J., Ferrara, R., and Campione, J. (1983). Learning, remembering and understanding. In Flavel, J. and Markman, E., editors, *Handbook of child psychology (4th edition). Vol III: Cognitive development* (pp. 77–166). New York: John Wiley.

Buchanan, J. (2001). Use of simulation technology in dental education. *Journal of Dental Education*, 65(11):1225–1231.

Buchanan, J. (2004). Experience with virtual reality-based technology in teaching restorative dental procedures. *Journal of Dental Education*, 68(12):1258–1265.

Buche, C., Querrec, R., Chevaillier, P., and Kermarrec, G. (2006). Apports des systèmes tutoriaux intelligents et de la réalité virtuelle à l'apprentissage de compétences. In *Cognito - Cahiers Romans de Sciences Cognitives (CRSC)*, 2(2):51–83.

Caens-Martin, S. (1999). "une approche de la structure conceptuelle d'une activité agricole : la taille de la vigne. *Education permanente*, 139.

Caens-Martin, S., Specogna, A., Delépine, L., and Girerd, S. (2004). Un simulateur pour répondre à des besoins de formation sur la taille de la vigne. *STICEF*, 11.

Caens-Martins, S. (2005). Concevoir un simulateur pour apprendre à gérer un système vivant à des fins de production : la taille de la vigne. In Pastré, P., editor, *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnelles*. Octares, Toulouse.

Casap, N., Wexler, A., Persky, N., Schneider, A., and Lustmann, J. (2004). Navigation surgery for dental implants: Assessment of accuracy of the image guided implantology system. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 62(2):166–119.

Chase, C., Chenoweth, P., Larsen, R., Olson, T., Hammond, A., Menchaca, M., Randel, R., Srinivasan, M., and Basdogan, C. (1997). Haptics in virtual environments: taxonomy, research status, and challenges. *Computers and Graphics*, 21(4):393–404.

Chen, C., Toh, S., and Fauzy, W. (2004). The theoretical framework for designing desktop virtual reality-based learning environments. *Journal of Interactive Learning Research*, 15(2):147–168.

Chevaillier, P. (2006). *Les systèmes multi-agents pour les environnements virtuels de formation*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bretagne Occidentale.

Chevennement, J. (1998). Malaises des opérateurs. *Club CRIN "Transports, groupe Simulateurs d'études*.

Clark, R. and Estes, F. (1996). Cognitive task analysis. *International Journal of Educational Research*, 25:403–417.

Clot, Y. (2000). La formation par l'analyse du travail : pour une troisième voie. In Maggi, B., editor, *Manières de penser, manières d'agir en éducation et en formation*. PUF, Paris.

Coates, P., Zealley, I., and Chakraverty, S. (2010). Endovascular simulator is of benefit in the acquisition of basic skills by novice operators. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 21(1):130–134.

Corbin, J. and Strauss, A. (2008). *Basics of Qualitative Research*. Sage, Los Angeles, CA, 3rd edition.

Cormier, S. and Hagman, J. (1987). *Transfer of learning: Contemporary research and applications*, chapter The structural processes underlying transfer of training (pp. 151–181). New York: Academic Press.

Cosman, P., Hugh, T., Shearer, C., Merrett, N. and Biankin, A., and Cartmill, J. (2007). Skills acquired on virtual reality laparoscopic simulators transfer into the operating room in a blinded, randomised, controlled trial. *Stud Health Technol Inform*, 125:76–81.

Cox, B. (1997). The rediscovery of the active learner in adaptive contexts : A developmental-historical analysis of transfer of training. *Educational Psychologist*, 24:41–55.

Craick, F. and Lockart, R. (1972). Levels of processing a framework for memory research. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behaviour*, 11:671–684.

Cromby, J., Standen, P., Newman, J., and Tasker, H. (1996). Successful transfer to the real world of skills practised in a virtual environment by students with severe learning difficulties. In *Proceedings of the ECDVRAT: 1st European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies* (pp. 103–107). Reading, UK: University of Reading.

Curnier, F. (2010). Teaching dentistry by means of virtual reality - the geneva project. *International Journal of Computerized Dentistry*, 13:251–263.

Davarpanah, M. and Szmukler-Moncler, S. (2007). *Théorie et pratique de la mise en charge immédiate*. Quintessence International.

De Corte, E. (1999). On the road to transfer: An introduction. *International Journal of Educational Research*, 31:555–559.

Detterman, K. (1993). *Transfer on trial: Intelligence, cognition, and instruction*, chapter The case for the prosecution: Transfer as an epiphenomenon (pp. 1–24). Norwood, NJ.: Ablex Publishing Corporation.

Draper, M., Virre, E., Furness, T., and Gawron, V. (2001). Effects of image scale and system time delay on simulator sickness within head-coupled virtual environments. *Humans factors*, 43(1):129–146.

Dumortier, E., Dequidt, J., Cotin, S., Duriez, C., Allard, J., and Rouland, J. (2010). Computer-based training system for cataract surgery. In *3rd International ICST Conference on Electronic Healthcare for the 21st Century*. Medical Conference.

Durlach, N. and Mavor, A. (1995). *Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges*. National Academy Press, Washington, DC.

Ericsson, K. (2004). Deliberate practice and the acquisition and maintenance of expert performance in medicine and related domains. *Academic Medicine*, 79(10):70–81.

Farmer, E., Van Rooij, J., Riemersma, J., Jorna, P., and Moraal, J. (1999). *Handbook of Simulator-Based Training*. Ashgate Publishing Limited.

Faverge, J.-M. (1955). Comment mener une analyse du travail ? In Ombredane, A. and Faverge, J.-M., editors, *L'analyse du travail*, (pp. 197–23). PUF, Paris.

Ferlitsch, A., Glauninger, P., Gupper, A., Schillinger, M., Haefner, M., Gangl, A., and Schoefl, R. (2002). Evaluation of a virtual endoscopy simulator for training in gastrointestinal endoscopy. *Endoscopy*, 34(9):698–702.

Flexman, R. and Stark, E. (1987). Training simulators. In Salvendy, G., editor, *Handbook of humans factors*. New York. John Wiley.

Forsslund, J., Sallnas, E., and Palmerius, K. (2009). A user-centered designed foss implementation of bone sugery simulation. In *Eurohaptics Conference, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Salt Lake City, UT, USA.

Fuchs, P., Arnaldi, B., and Tisseau, J. (2003). La réalité virtuelle et ses applications. In Fuchs, P. and Moreau, G., editors, *Le traité de la réalité virtuelle* (vol 2, pp. 3–52). Les Presses de l'école des mines de Paris.

Gick, M. and Holyoak, K. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15:1–38.

Gick, M. and Holyoak, K. (1987). The cognitive basis on knowledge transfer. In Cormier, S. and Hagman, J., editors, *Transfer of learning. Contemporary research and applications* (pp. 9–46). New York: Academic Press.

Ginsbourger, F., Merle, V., and Vergnaud, G. (1992). *Formation et apprentissage des adultes peu qualifiés*. La documentation française.

Gordon, S. and Gill, R. (1997). Cognitive task analysis. In Zsombok, C. and Klein, G., editors, *Naturalistic decision making* (pp. 131–140). Lawrence Erlbaum Associates.

Grau, J.-Y., Doireau, P., and Poisson, R. (1998). Conception et usage de la simulation. *Le travail humain*, 61(4):361–385.

Harders, M., Steinemann, D., Gross, M., and Székely, G. (2005). A hybrid cutting approach for hysteroscopy simulation. In *Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention MICCAI'05* (vol 3750, pp. 567–574).

Haskell, R. (2001). *Transfer of learning: Cognition, instruction and reasoning*. San Diego:Academic Press.

Heiland, H., Petersik, A., Pflessner, B., Tiede, U., Schmelzle, R., Höhne, K., and Handels, H. (2004). Realistic haptic interaction for computer simulation of dental surgery. *International Congress Series*, 1268:1226–1229.

Herviou, D. and Maisel, E. (2005). Areviroad : a traffic road simulator to learn how to behave. In *Cyberworlds, 2005. International Conference on* (pp. 253–262). Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society.

Hietala, P. and Niemirepo, T. (1998). Multiple artificial teachers: how do learners cope with a multi-agent learning environment. In Ayala, G., editor, *International Workshop on Current Trends and Applications of Artificial Intelligence and Education* (pp. 33–40). ITESM, Mexico City, Mexico.

Hoc, J.-M. (1991). Effet de l’expertise des opérateurs et de la complexité des situations dans la conduite d’un processus à long délai de réponse : le haut fourneau. *Le travail humain*, 54(3):225–249.

Holyoak, K. and Thagard, P. (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge, MA: MIT Press.

Iwata, N., Fujiwara, M., Koderu, Y., Tanaka, C., Ohashi, N., Nakayama, G., Koike, M., and Nakao, A. (2010). Construct validity of the lapvr virtual-reality surgical simulator. *Surgical Endoscopy*, 6(6).

Jabero, M. and Sarment, D. (2006). Advanced surgical guidance technology : a review. *Implant Dentistry*, 15(2):135–142.

Jasinevicius, R., Landers, M., Nelson, S., and Urbankova, A. (2004). An evaluation of two dental simulation systems : virtual reality versus contemporary non-computer-assisted. *Journal of Dental Education*, 68(11):1151–1162.

Joab, M., Guéraud, V., and Auzende, O. (2006). Les simulations pour la formation. In Grandbastien, M. and Labat, J.-M., editors, *Environnements informatiques pour l’apprentissage humain*. Hermès Lavoisier, Paris.

Johnson, L., Thomas, G., Dow, S., and Stanford, C. (2000). An initial evaluation of the iowa dental surgical simulator. *Journal of Dental Education*, 64(12):847–853.

Jonnaert, P. (2002). *Compétences et socioconstructivisme. Un cadre théorique*. De Boeck, Bruxelles.

Kim, K. and Park, J. (2009). Virtual bone drilling for dental implant surgery training. In *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST ’09* (pp. 91–94). New York, NY, USA. ACM.

Kim, L. and Park, S. (2006). Haptic interaction and volume modeling techniques for realistic dental simulation. *Visual Computer*, 22:90–98.

Kozak, P., Hancock, E., Arthur, E., and Chrysler, S. (1993). Transfer of training from virtual reality. *Ergonomics*, 36(7):777–784.

Kusumoto, N., Sohmura, T., Yamada, S., Wakabayashi, K., Nakamura, T., and Yatani, H. (2006). Application of virtual reality force feedback haptic device for oral implant surgery. *Clinical Oral Implants Research*, 17:708–713.

Lécuyer, A., Congedo, M., Gentaz, E., Joly, O., and Coquillart, S. (2010). Influence of visual feedback on passive tactile perception of speed and spacing of rotating gratings. In

Kappers, A., van Erp, J., Bergmann Tiest, W., and van der Helm, F., editors, *Proceedings of the 2010 international conference on Haptics - generating and perceiving tangible sensations: Part II*, volume 6192 of *EuroHaptics'10* (pp. 73–78). Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.

Le Pallec, A., Pasco, D., Guinard, J.-Y., Zager, A., Herviou, D., Martinaud, K., and Maisel, E. (2007). Le simulateur d'apprentissage de la conduite en contexte urbain aréviroad : Une validation par l'analyse du comportement habituel de conducteurs expérimentés. *Recherche Transport Sécurité*, 97:283–300.

Leblanc, V., Urbankova, A., Hadavi, F., and Lichtenthal, R. (2004). A preliminary study in using virtual reality to train dental students. *Journal of Dental Education*, 68(3):378–383.

Leea, J., Qiua, B., Teshomea, M., Raghavana, S., Tedescoa, M., and Dalmana, R. (2009). The utility of endovascular simulation to improve technical performance and stimulate continued interest of preclinical medical students in vascular surgery (apdvs submission). *Journal of Surgical Education*, 66(2):65.

Lehmann, K., Ritz, J., Maass, H., Cakmak, H., Kuehnappel, U., Germer, C., and Bretthauer, G. and Buhr, H. (2005). A prospective randomized study to test the transfer of basic psychomotor skills from virtual reality to physical reality in a comparable training setting. *Annals of surgery*, 241(3):442–449.

Leplat, J. (1985). Les représentations fonctionnelles dans le travail. *Psychologie française*, 30(3-4):263–278.

Leplat, J. (2000). *L'analyse psychologique de l'activité en ergonomie*. Octarès, Toulouse.

Lim, M., Afsharzand, Z., Rashedi, B., and Petropoulos, V. (2005). Predoctoral implant education in u.s. dental schools. *Journal of Prosthodontics*, 14(1):46–56.

Lin, J., Duh, H., Abi-Rached, H., Parker, D., and Furness, T. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. *Virtual Reality Conference, IEEE* (pp. 164–171).

Liu, A., Tendick, F., Cleary, K., and Kaufmann, C. (2003). A survey of surgical simulation: Applications, technology, and education. *Presence*, 12(6):599–614.

Liu, G., Zhang, Y., and Townsend, W. (2008). Force modeling for tooth preparation in a dental training system. *Virtual Reality*, 12(3):125–136.

Lourdeaux, D. (2001). *Réalité Virtuelle et Formation: Conception d'environnements Virtuels pédagogiques*. PhD thesis, Ecoles des mines de Paris.

Luciano, C., Banerjee, P., and DeFanti, T. (2009). Haptics-based virtual reality periodontal training simulator. *Virtual Reality*, 13:69–85.

Marras, L., Nikolaidis, N., Mikrogeorgis, G., Lyroudia, K., and Pitas, L. (2008). A virtual system for cavity preparation in endodontics. *Journal of Dental Education*, 72(4):494–502.

Mestre, D. (2004). *Psychologie ergonomique: tendances actuelles*, chapter Activités sensori-motrices : Apports de la Réalité Virtuelle à la Psychologie Ergonomique. Presses Universitaires de France.

Misko, J. (1995). *Transfer: Using Learning in New Contexts*. Leabrook, Australia: NCVER.

Misko, J. (1999). *The transfer of knowledge and skill to different contexts: An empirical perspective*. NCVER, Leabrook SA, Australia.

Montgomery, K., Heinrichs, L., Bruyns, C., Wildermuth, S., Hasser, C., Ozenne, S., and Bailey, D. (2001). Surgical simulator for hysteroscopy: a case study of visualization in surgical training. In *Proceedings of the conference on Visualization '01* (pp. 449–452). San Diego, California.

Moreau, R., Ochoa, V., Pham, M., Boulanger, P., Redarce, T., and Dupuis, O. (2007a). Evaluation of obstetric gestures: an approach based on the curvature of 3-d positions. In *IEEE/EMBS International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*. Lyon, France.

Moreau, R., Pham, M., Silveira, R., Redarce, T., Brun, X., and Dupuis, O. (2007b). Design of new instrumented forceps: Application to safe obstetrical forceps blade placement. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 54(7):1280–1290.

Muffler, R. (1985). Av-8b harrier ii training capabilities. In *Collection of Technical Papers - AIA Flight Simulation Technology Conference* (pp. 11–15). St Louis, MO, USA.

Mufti-Alchawafa, D., Luengo, V., and Vadcard, L. (2007). Un modèle informatique pour la production de rétroactions épistémiques. l'exemple d'un environnement d'apprentissage en chirurgie. In *Actes de la conférence Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 35–46). Lausanne.

Munz, Y., Kumar, B., Moorthy, K., Bann, S., and Darzi, A. (2004). Laparoscopic virtual reality and box trainers: is one superior to the other ? *Surgical Endoscopy*, 18(3):485–494.

Ohtani, T., Kusumoto, N., Wakabayashi, K., Yamada, S., Nakamura, T., Kumazawa, Y., Yatani, H., and Sohmura, T. (2009). Application of haptic device to implant dentistry : accuracy verification of drilling into a pig bone. *Dental Materials Journal*, 28(1):75–81.

Ombredane, A. and Faverge, J. (1955). *L'analyse du travail ; facteur d'économie humaine et de productivité*. PUF, Paris.

Paillé, P. and Mucchielli, A. (2008). *L'analyse qualitative en sciences humaines et sociales*. Armand Colin, Paris.

Pastré, P. (1992). Requalification des ouvriers spécialisés et didactique professionnelle. *Education Permanente*, 111:35–54.

Pastré, P. (1994). Le rôle des schèmes et des concepts dans la formation des compétences. *Performances humaines et techniques*, 71:21–28.

Pastré, P. (1999a). La conceptualisation dans l'action: bilan et perspectives. *Education Permanente*, 139:13–35.

Pastré, P. (1999b). L'ingénierie didactique professionnelle. In Carré, P. and Caspar, P., editors, *Traité des sciences et des techniques de la formation* (pp. 403–417). Dunod, Paris.

Pastré, P. (2002). L'analyse du travail en didactique professionnelle. *Revue Française de Pédagogie*, 138:9–17.

Pastré, P. (2005a). Analyse d'un apprentissage sur simulateur : des jeunes ingénieurs aux prises avec la conduite de centrales nucléaires. In Pastré, P., editor, *Apprendre par la simulation: De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Octares, Toulouse.

Pastré, P. (2005b). Analyse d'un apprentissage sur simulateur : des jeunes ingénieurs aux prises avec la conduite de centrales nucléaires. In Pastré, P., editor, *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Octares, Toulouse.

Pastré, P., Mayen, P., and Vergnaud, G. (2006). La didactique professionnelle. note de synthèse. *Revue Française de Pédagogie*, 154:145–198.

Patrick, J. (1992). *Training: Research and Practice*. Academic Press, San Diego, USA.

Perkins, D. and Salomon, G. (1988). Teaching for transfer. *Educational Leadership*, 46(1):22–32.

Perkins, D. and Salomon, G. (1989). Are cognitive skills context-bound ? *Educational Researcher*, 18(1):16–25.

Peugnet, F., Dubois, P., and Rouland, J. (1997). Clinical assessment of a training simulator for retinal photocoagulation. In Troccaz, J., Grimson, E., and Mosges, R., editors, *CVRMed-MRCAS'97*, volume 1205 of *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 409–412). Springer Berlin / Heidelberg.

Phillips, J. and Berge, Z. (2009). Second life for dental education. *Journal of Dental Education*, 73(11):1260–1264.

Piaget, J. (1967). *Biologie et connaissance*. Gallimard, Paris.

Piaget, J. (1974). *Réussir et comprendre*. PUF, Paris.

Pohlenz, P., Gröbe, A., Petersik, A., Sternberg, N., Pflesser, B., Pommert, A., Höhne, K., Tiede, U., Springer, I., and Heiland, M. (2010). Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school. *Journal of cranio-maxillofacial surgery*, 38(8):560–564.

Popovici, D., Querrec, R., Harrouet, F., Le Gal, C., Serbanati, L., and Morvan, S. (2005). Virtualdive: A vr-based educational virtual environment. In *Seventh International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC'05)*.

Presseau, A. and Frenay, M. (2004). *Le transfert des apprentissages: Comprendre pour mieux intervenir*. Presses de l'université de Laval.

Pspotka, J. (1995). Immersive training systems: virtual reality and education and training. *Instructional science*, 23:405–431.

Quinn, F., Keogh, P., McDonald, A., and Hussey, D. (2003a). A pilot study comparing the effectiveness of conventional training and virtual reality simulation in the skills acquisition of junior dental students. *European journal of dental education*, 7:13–19.

Quinn, F., Keogh, P., McDonald, A., and Hussey, D. (2003b). A study comparing the effectiveness of conventional training and virtual reality simulation in the skills acquisition of junior dental students. *European journal of dental education*, 7(4):164–169.

Regian, J. (1997). Virtual reality for training: evaluating transfer. In Kreutzer, J. and Wehman, P., editors, *Community Integration Following Traumatic Brain Injury: A Functional Approach* (pp. 157–169). Baltimore: Paul H. Brookes.

Renouard, F. and Rangert, B. (2005). *Prise de décision en pratique implantaire*. Quintessence International.

Rhienmora, P., Gajananan, K., Haddawy, P., Suebnukarn, S., Dailey, M., Supataratarn, E., and Shrestha, P. (2010a). Haptic augmented reality dental trainer with automatic performance assessment. In Press, A., editor, *International Conference on Intelligent User Interfaces*. Hong Kong.

Rhienmora, P., Haddawy, P., Dailey, M., and Khanal, P. (2008). Development of a dental skills training simulator using virtual reality and haptic device. *NECETEC Technical journal*, 8:140–147.

Rhienmora, P., Haddawy, P., Khanal, P., Suebnukarn, S., and Dailey, M. (2010b). A virtual reality simulator for teaching and evaluating dental procedures. *Methods of Information in Medicine*, 49(4):396–405.

Rogalski, J. (2004). La didactique professionnelle : une alternative aux approches de "cognition située" et "cognitiviste" en psychologie des acquisitions. *@ctivités*, 1(2)(2):103–120.

Rose, F., Attree, E., Brooks, B., Parslow, D., Penn, P., and Ambihaipahan, N. (2000). Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics*, 43(4):494–511.

Rose, J., Buchanan, J., and Sarrett, D. (1999). The dentsim system. *Journal of Dental Education*, 63(5):421–423.

Rouland, J., Dubois, P., Chaillou, C., Mesuree, P., Karpf, S., Godin, S., and Duquenoy, F. (1995). Sophocle : Simulateur ophtalmologique de photocoagulation laser. contribution de la réalité virtuelle. *Journal français d'ophtalmologie*, 18(8-9):536–541.

Ruppin, J., Popovic, A., Strauss, M., Spüntrup, E., Steiner, A., and Stoll, C. (2008). Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology: optical tracking vs. stereolithographic splint systems. *Clinical oral implants research*, 19(7):709–716.

Salas, E., Bower, C., and Rhodenizer, L. (1998). It is not how much you have but how you use it: toward a rational use of simulation to support aviation training. *The International Journal of Aviation Psychology*, 8(3):197–208.

Samurçay, R. (2005). Concevoir des situations simulées pour la formation professionnelle : une approche didactique. In *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Octares.

Samurçay, R. and Pastré, P. (1995). La conceptualisation des situations de travail dans la formation des compétences. *Education Permanente*, 123:13–32.

Samurçay, R. and Pastré, P. (1998). L'ergonomie et la didactique. l'émergence d'un nouveau champ de recherche: didactique professionnelle. In *Actes du colloque "Recherche et Ergonomie"* (pp. 119–127). Toulouse.

Samurçay, R. and Pastré, P. (2004). *Recherches en didactique professionnelle*. Octarès, Toulouse.

Samurçay, R. and Rogalski, J. (1998). Exploitation didactique des situations de simulation. *Le travail humain*, 61(4):333–359.

Savoyant, A. (1979). Eléments d'un cadre d'analyse de l'activité : quelques concepts essentiels de la psychologie soviétique. *Cahiers de psychologie*, 22:248–252.

Schmidt, R., Younga, D., Swinnena, S., and Shapiroa, D. (1989). Summary knowledge of results for skill acquisition: support for the guidance hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(2):352–359.

Schneider, W. (1985). Training high-performance skills: fallacies and guidelines. *Humans Factors*, 27:285–300.

Seymour, N., Gallagher, A., Roman, A., O'Brien, M., Bansal, V., Andersen, D., and M. Satava, R. (2002). Virtual reality training improves operating room performance. *Annals of surgery*, 236:458–464.

Silveira, R. (2004). *Modelisation et conception d'un nouveau simulateur d'accouchement (BirthSIM) pour l'entraînement et l'enseignement des jeunes obstétriciens et des sages-femmes*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Singley, M. and Anderson, J. (1989). *Transfer of cognitive skill*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Smith, C. (2009). Simulation technology: a strategy for implementation in surgical education and certification. *Presence tele-operators and virtual environments*, 9:632–637.

Soumya, B. and Ramachandra, S. (2011). Haptics application in dentistry: is the time poised yet ? *Dental hypotheses*, 2(1):9–15.

Steinberg, A., Banerjee, P., Drummond, J., and Zefran, M. (2003). Progress in the development of a haptic/virtual reality simulation program for scaling and root planning. *Journal of Dental Education*, 67(2):161.

Steinberg, A., Bashook, P., Drummond, J., Ashrafi, S., and Zefran, M. (2007). Assessment of faculty perception of content validity of periosim©, a haptic-3d virtual reality dental training simulator. *Journal of Dental Education*, 7(12):1574–1582.

Subedi, B. (2004). Emerging trends of research on transfer of learning. *International education journal*, 5(4):591–599.

Suchman, L. (1987). *Plans and situated actions: the problem of human-machine communication*. Cambridge University Press, Cambridge.

Suebnuarn, S., Haddawy, P., Rhienmora, P., and Gajananan, K. (2010). Haptic virtual reality for skill acquisition in endodontics. *journal of endodontics*, 36(1):53–55.

Suebnuarn, S., Phatthanasathiankul, A., Sombatweroje, S., Rhienmora, P., and Haddawy, P. (2009). Process and outcome measures of expert/novice performance on a haptic virtual reality system. *journal of dentistry*, 37(37):658–665.

Tardif, J. (1999). *Le transfert des apprentissages*. Montréal: Les Éditions Logiques.

Tchounikine, P. (2002). Pour une ingénierie des environnements informatiques pour l'apprentissage humain. *Revue i3 information - interaction - intelligence*, 2(1):99–114.

Tchounikine, P., Baker, M., Balacheff, N., Baron, M., Derycke, A., Guin, D., Nicaud, J., and Pierre, R. (2004). Platon-1: quelques dimensions pour l'analyse des travaux de recherche en conception d'eiah. *Rapport de l'Action spécifique « Fondements théoriques et méthodologiques de la conception des EIAH »*.

Theureau, J. (2009). *Le cours d'action: Méthode réfléchie*. Octares, Toulouse.

Thomas, G., Johnson, L., Dow, S., and Stanford, C. (2001). The design and testing of a force feedback dental simulator. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 64:53–64.

Tisseau, J. (2001). *Réalité virtuelle : autonomie in virtuo*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Rennes 1.

Tisseau, J. and Harrouet, F. (2003). *Autonomie des entités virtuelles*. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, deuxième édition.

Tonetti, J., Vadcard, L., Girard, P. and Dubois, M., Merloz, P., and Troccaz, J. (2009). Évaluation d'un simulateur de vissage iliosacré percutané. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 95(7):572–578.

Torkington, J., Smith, S., Rees, B., and Darzi, A. (2001). Skill transfer from virtual reality to a real laparoscopic task. *Surgical Endoscopy*, 15:1076–1079.

Tse, B., Harwin, W., Barrow, A., Quinn, B., San Diego, J., and Cox, M. (2010). Design and development of a haptic dental training system - haptel. In *Proceedings of the 2010 international conference on Haptics - generating and perceiving tangible sensations: Part II*, volume 6192 of *EuroHaptics '10* (pp. 101–108). Amsterdam. Springer-Verlag.

Vadcard, L. (2005). Conception d'un environnement informatique pour la formation des chirurgiens. In *4èmes rencontres scientifiques de l'Association pour la Recherche en Didactiques des Sciences et des Technologies*, Lyon.

Vadcard, L., Dubois, M., Tonetti, J., and Luengo, V. (2009). Transmission de l'expérience en chirurgie percutanée : Analyse cognitive et conception d'outils de formation. In *1er Colloque international francophone de l'association Recherches et Pratiques en Didactique Professionnelle*. AgroSup Dijon.

Vadcard, L. and Luengo, V. (2005). Réduire l'écart entre formation théorique et pratique en chirurgie : conception d'un eiah. In *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 129–139). Montpellier.

Varela, F. (1989). *Connaître les sciences cognitives : tendances et perspectives*. Seuil, Paris.

Vergnaud, G. (1992). Approches didactiques en formation d'adultes. *Education permanente*, 111:21–31.

Vergnaud, G. (1996). "au fond de l'action, la conceptualisation". In Barbier, J.-M., editor, *Savoirs théoriques, savoirs d'action* (pp. 275–292). PUF, Paris.

Vidal-Gomel, C. (2005). Situation de simulation pour la recherche : quels apports pour la formation professionnelle ? un exemple dans le domaine de la maintenance des systèmes électriques. In Pastré, P., editor, *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Octares, Toulouse.

Volbracht, S., Domik, G., Backe-Neuwaldand, D., and Rickens, H. (1998). The “citygame”: an example of a virtual environment for teaching spatial orientation. *Journal of Universal Computer Science*, 4(4):461–465.

Von Cranach, M. and Harre, R. (1982). *The analysis of action. Recent theoretical and empirical advances*. Cambridge University Press - Editions de la Maison des Sciences de l’Homme, Cambridge - Paris.

Von Sternberg, N., Bartsch, M., Petersik, A., Wiltfang, J., Sibbersen, W., Grindel, T., Tiede, U., Warnke, P., Heiland, M., Russo, P., Terheyden, H., and P., P. (2007). Learning by doing virtually. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 36:386–390.

Vygotsky, L. and Cole, M. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

Waller, D., Hunt, E., and Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence: teleoperators and virtual environments*, 7:129–143.

Wang, D., Zhang, Y., Wang, Y., Lü, P., Zhou, R., and Zhou, W. (2009). Haptic rendering for dental training system. *Science in China Series F: Information Sciences*, 52(3):529–546.

Webber, C., Bergia, L., Pesty, S., and Balacheff, N. (2001). The baghera project: a multi-agent architecture for human learning. In Vassileva, J., editor, *Workshop on Multi-Agent Architectures for Distributed Learning Environments* (pp. 12–17). San Antonio, TX, USA.

Wierinck, E., Puttemans, V., Swinnen, S., and Van Steenberghe, D. (2007). Expert performance on a virtual reality simulation system. *Journal of Dental Education*, 71(6):759–766.

Wilhelm, D., Ogan, K., Roehrborn, C., Cadeddu, J., and Pearle, M. (2002). Assessment of basic endoscopic performance using a virtual reality simulator. *Journal of the American College of Surgeons*, 195(5):675–681.

Wilson, P., Foreman, N., and Tlauka, M. (1996). Transfer of spatial information from a virtual to a real environment in physically disabled children. *Disability and rehabilitation*, 18:633–637.

Yau, H., Tsou, L., and Tsai, M. (2006). Octree-based virtual dental training system with a haptic device. *Computer-Aided Design & Applications*, 3:415–424.

Yoshida, Y., Yamaguchi, S., Wakabayashi, K., Nagashima, T., Takeshige, F., Kawamoto, Y., Noborio, H., and Sohmura, T. (2009). Virtual reality simulation training for dental surgery. *Studies In Health Technology And Informatics*, 142:435–437.

Youngblood, P., Srivastava, S., Curet, M., Heinrichs, L., Dev, P., and Wren, S. (2005). Comparison of training on two laparoscopic simulators and assessment of skills transfer to surgical performance. *Journal of the American College of Surgeons*, 200(4):546–551.

Zaychik, k., Cardullo, F., and Lewis, H. (2004). New approaches for simulator sickness assessment. *DSC 2004 Europe : driving simulation conference* (pp. 343–353).

Annexe : Guide d'entretien

1) Questionnement initiale :

1-1) Caractérisation du dentiste :

Formation initiale ? (année ? lieu ? avantages ? limites ?)

Formation à l'implantologie ? (année ? lieu ? avantage ? limites ? laps de temps entre la formation et le passage à l'acte ?)

Expertise en implantologie (nombre d'années d'expériences ? nombre d'implants posés par an ?)

Demander de s'étendre sur la formation en implantologie en général :

- Les différents types de formation
- Leurs avantages et leurs limites

Type d'activité : (ex : omnipraticien ? chirurgien-dentiste ? professeur d'université ?)

Latéralité ?

1-2) Le dentiste et l'implantologie :

Qu'est-ce qui vous a conduit à aller vers l'implantologie ?

Votre 1er implant (date ? condition ? type de cas ?)

Nombre maximum d'implants que vous avez posés en une intervention ?

Nombre d'interventions que vous pouvez réaliser par jour ?

Durée moyenne d'une intervention ?

La signification de l'implantologie à vos yeux ?

Parmi les trois protocoles implantaires existant, lequel ou lesquels pratiquez-vous ? pourquoi ? quel indicateur vous permet-il de choisir un protocole plutôt qu'un autre ?

Le guide chirurgical

- en utilisez-vous ?
- si oui, dans quel cas ?
- avantages et limites ?

Les implants

- Posez –vous plusieurs marques d'implants ? Si oui, pourquoi ? avantages, limites, modes de sélection par rapport au patient ?
- Gestion de vos implants ? (à la commande / avez-vous du stock ?)
- Si vous avez du stock vous arrive-t-il de changer en cours d'intervention le modèle d'implant que vous allez poser ?

Votre prothésiste (mode de relation ? fonctionnement ?)

Votre assistance (sa formation ? est-ce régi par la loi ? son rôle ?)

1-3) Préparation de l'intervention filmée

Problème initial du patient ? diagnostic ?

Choix du traitement

- Solutions alternatives ?
- Indices amenant à la pose d'implant ?
 - prérequis pour l'implantologie ?
 - contre-indications ?
 - condition indispensable pour poser un implant ?

Bilan ? besoin de soins annexes ?

Examens réalisés

- Radiographies ? modèle en plâtre ?
- Indicateurs pour choisir entre les différents examens possibles ?
- Mesures et/ou informations prises sur les examens ?

Planification implantaire

- Nombre d'implants à poser ?
- Placement de l'implant ?
- Orientation / angulation de l'implant ?
- Enfouissement de l'implant ?
- Choix du type – de la forme – et des dimensions de l'implant ?
- Gestion des forces exercées sur l'implant ?

Guide chirurgical

- Oui/non
- Si oui, comment a-t-il été réalisé ?
- Avantages et limites ?

Conclusion

- Nombre de rendez-vous avec ce patient ?
- Pour chaque rendez-vous, buts et actions menées ?
- Quelles sont les étapes-clés ?

2) Entretien d'auto-confrontation

2-1) Définition du poste de travail :

Matériel utilisé

- Qui a placé les instruments ?
- Ordonnancement des instruments : y a-t-il un ordre prédéfini ?
si oui pourquoi ? quel est le but ?
- Définition et fonction de chaque instrument
- La taille de vos instruments est-elle standard ou adaptée à la physiologie du patient ?

Le patient

- Position du patient sur le fauteuil, inclinaison du fauteuil ?
- Cette position dépend –elle du site implantaire ?
- Votre positionnement par rapport au patient ?

L'éclairage

- Réglage ? objectif ?
- Devez-vous le modifier pendant l'intervention ?

2-2) Définition du site implantaire

Type d'édentement (unitaire ? partiel ? totale) ?

Localisation

- Antérieur / postérieur (besoin d'esthétisme) ?
- Mandibule/ maxillaire ?

- N° de la dent où l'implant va être posé ?

Incision

- Type ?
- Grandeur ?
- Avec / sans lambeau ?

Estimation de la

- Quantité osseuse (au vu des examens) ?
- Densité osseuse (au vu des examens) ?
- Cicatrisation (post-extraction, greffe osseuse) ?

Épaisseur

- Crête osseuse
- Gencive

2-3) Définition de chaque partie de l'intervention

2-3-1) Questions communes à chaque partie

Nom de la partie ?

But

- Quel est le but de la tâche ?
- Quel objectif poursuivez-vous ?

Instruments

- Quel(s) instrument(s) utilisez-vous ?

- Caractéristiques ?
- Fonction ?
- Orientation de l'outil dans l'espace ?

Action / décision

- Actions réalisées ?
- Décisions prises ?
- Les actions réalisées sont fixes d'une chirurgie à l'autre ou sont-elles adaptées en fonction du site implantaire ?

Indicateurs : (visuel, métrique, tactile)

- De contrôle
- De réussite
- De fin d'étape

Position de mains

- Définition de la position de mains (point d'appui : flan, doigt..) ?
- Évolution au cours de l'intervention ?

Sensations

- Quelles sensations avez-vous ?
- Quelles informations tirez-vous de vos sensations ?
- Avez-vous besoin de force ?

Relevez et commentez le temps d'action effectif (temps utile pour l'étape)

Commentaires

- Est-ce la seule manière de faire ? Si non, avantages et inconvénients de votre manière de faire
- Informations supplémentaires à ajouter

2-3-2) Questions supplémentaires spécifiques aux parties de la séquence de forage et de la mise en place de l'implant

Réglage du moteur

- Vitesse ?
- Torque ?
- Avez-vous des programmes prédéfinis ?

Position

- Position planifiée ?
- Position réalisée ?
- Indices de contrôle ?

Profondeur

- Profondeur planifiée ?
- Profondeur réalisée ?
- Indices de contrôle ?
- Présence d'une butée ?

Axe du forage

- Axe planifié
- Axe réalisé ?
- Indicateurs de contrôle
- Comment faites-vous pour vous mettre dans l'axe ? Pour le

reproduire à l'identique ?

Différences d'un forage à l'autre ?

2-3-3) Questions supplémentaires pour la mise en place de l'implant

Enfouissement

- Enfouissement planifié
- Enfouissement réalisé
- Indicateurs de contrôle

2-4) Étapes du suivi post-opératoire

Suite :

- Combien de rendez-vous reste-t-il jusqu'à la fin du traitement ?
- Buts et action à mener par rendez-vous ?

Réussite

- Points à surveiller
- Chances de réussite
- Point d'attention – de vérification ?
- Facteurs d'échec (court – moyen – long terme)

Phase prothétique ?

Résumé

Notre travail de recherche s'inscrit dans le cadre des études menées au Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV) sur les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH). Dans ce cadre, nous développons en collaboration avec des experts métiers, des chercheurs en informatique et la société Didhaptic, l'EVAH VirTeaSy dédié à l'apprentissage en implantologie dentaire. L'objectif de cette thèse est double : 1) contribuer à la production de connaissances dans le champ théorique de la didactique professionnelle sur les activités liées aux systèmes vivants ; 2) aider à la conception, à l'ingénierie pédagogique et à l'évaluation de l'EVAH VirTeaSy. Ce projet se déroule en trois phases : analyse de l'activité des chirurgiens-dentistes, conception et ingénierie pédagogique de l'EVAH VirTeaSy à partir des résultats de l'étude 1 et, évaluation de l'EVAH VirTeaSy.

L'examen de la littérature dans le domaine des EVAH dentaires montre que les EVAH « haptiques » semblent être les plus pertinents pour répondre aux problématiques de formation en implantologie. Cependant, bien que des études montrent leur efficacité du point de vue de l'apprentissage, il reste des problèmes à résoudre en termes de méthodologie de conception. En effet, la démarche de conception s'appuie couramment sur des collaborations entre experts métiers et informaticiens qui aboutissent au développement d'EVAH technocentrés. Afin de contourner les écueils constatés dans ce type de démarche, nous choisissons d'inclure les sciences humaines sur l'ensemble du processus de conception de l'EVAH.

Pour identifier les compétences à viser dans l'EVAH, nous mobilisons, dans le cadre de la didactique professionnelle, une analyse de l'activité. Celle-ci se finalise par l'identification de la structure conceptuelle de la situation reposant sur des concepts organisateurs de l'activité en liens avec des variables et des indicateurs.

Notre première étude s'attache ainsi à identifier la structure conceptuelle de la situation en implantologie dentaire. Au cours de situations réelles de pose d'implant dentaire, des données d'enregistrement ont été recueillies et complétées par des verbalisations obtenues lors d'entretiens d'auto-confrontation. L'analyse des données à l'aide de la méthodologie des catégories conceptualisantes nous a permis de faire émerger les concepts organisant l'activité des dix chirurgiens-dentistes observés. L'activité d'implantologie consiste à réaliser un compromis entre le concept organisateur « d'émergence » qui permet de réaliser le projet prothétique et le concept « d'ancrage » qui permet au projet prothétique de durer dans le temps. Ces deux concepts n'étant pas toujours convergents.

La conception de VirTeaSy s'appuie sur les résultats de l'étude 1. En effet, l'objectif de notre EVAH est de permettre aux apprenants de construire la structure conceptuelle de la situation et de faire des liens entre les concepts, variables et indicateurs afin de gérer les

conflits auxquels ils sont confrontés en situation réelle. Pour ce faire, nous mettons en place une méthodologie en cinq étapes qui définit : le type d'EVAH à concevoir et ses caractéristiques « hardware », l'environnement virtuel et les situations d'apprentissage, l'enrichissement des situations d'apprentissage grâce à la réalité virtuelle, la gestion de la complexité dans l'EVAH, et l'intégration de l'EVAH à un dispositif global de formation. Notre expérience de cette mise en œuvre méthodologique montre qu'il faut constamment faire des choix. Ces choix reposent dans un premier temps sur la littérature et conduisent à définir des éléments de conception généraux. Ces éléments sont ensuite spécifiés à l'aide des résultats de l'analyse de l'activité, celle-ci prend alors toute sa pertinence afin que l'EVAH traduise les compétences-clefs que les apprenants doivent construire pour être efficaces.

Idéalement, l'étude 2 aurait dû évaluer la capacité de VirTeaSy à permettre aux apprenants de construire la structure conceptuelle de la situation. Cependant, l'étude d'évaluation s'est déroulée dans le cadre du projet « Formarev » dont les échéances ont contraint la période d'expérimentation. Ainsi, nous mobilisons pour cette étude une version Beta de VirTeaSy n'intégrant pas l'ensemble des fonctionnalités déduites de l'analyse de l'activité. L'étude réalisée porte sur l'apprentissage d'un geste chirurgical grâce à un EVAH basé sur une interaction « haptique » et sur son transfert du virtuel au réel. Plus précisément, cette expérimentation s'attache à montrer l'intérêt d'une formation en réalité virtuelle en comparaison avec une formation traditionnelle ou une absence de formation. Pour ce faire, trente-deux dentistes sont répartis de façon aléatoire dans trois groupes : un groupe (n=10) nommé GRV formé dans VirTeaSy, un groupe (n=11) nommé GT formé de manière traditionnelle et un groupe (n=11) nommé contrôle (GC) ne recevant aucune formation. Tous les sujets sont novices en implantologie dentaire. Une semaine après que chaque groupe ait suivi sa formation, tous les sujets réalisent la tâche de réinvestissement consistant à poser un implant sur un cadavre humain. Pour chaque sujet, nous mesurons, à l'aide d'un scanner, la différence entre la performance demandée et la performance réalisée. Les mesures portent sur l'angulation, l'émergence et la centration. Nos résultats ne montrent pas de différence significative entre les trois groupes. Aucune des deux formations à l'implantologie ne provoquent, dans les conditions de l'expérimentation, une amélioration significative des performances des sujets dans la tâche de réinvestissement. Pour finir, notons que si l'évaluation de VirTeaSy n'a pas produit les résultats que nous attendions, elle fut extrêmement riche et pertinente du point de vue de la réflexion à mener sur la construction et le contenu d'une formation utilisant les technologies de la réalité virtuelle.

Des prolongements à cette thèse sont en cours de mise en œuvre. Certains reposent sur des partenariats internationaux avec des universités reconnues. Il s'agit : 1) d'étendre l'analyse de l'activité à une population internationale ; 2) d'évaluer VirTeaSy grâce à différents protocoles incluant les fonctionnalités issues de l'analyse de l'activité ; 3) d'élargir le périmètre de formation de VirTeaSy à l'odontologie. Enfin, un projet collaboratif a été déposé au « Pôle Images & Réseaux » pour rendre générique cette démarche de conception d'EVAH en s'appuyant sur la plate-forme de développement « Mascaret ».

Mots-clefs : analyse de l'activité, conception, évaluation, EVAH, didactique professionnelle, implantologie.

Summary

"Activity analysis to help the design and the assessment of Virtual Environment for Training : The case of dental implantology. "

Our research is conducted within the context of studies of Virtual Environment for Training (V.E.T) at the European Center of Virtual Reality. Within this perspective, we developed a V.E.T. for dental implantology, in collaboration with computer scientists and dental experts. This V.E.T is called VirTeaSy (Virtual Teaching System). The objective of this thesis is twofold: 1) to build knowledge in the theoretical field “didactique professionnelle” for living systems activities; 2) to help design and assess VirTeaSy. This project is in three parts : Activity analysis of dentists (study #1); design of VirTeaSy from the results of study #1; assess VirTeaSy (study #2).

An analysis of the literature in dental V.E.T showed that “haptic V.E.T.” seem to be the most relevant for the challenge of training in dental implantology. However, some studies show, there are still problems to be solved in terms of design methodology. Indeed, the usual design approach relies on collaboration between dental experts and IT engineers. In this approach, IT engineers carry on the V.E.T. development. This means that the result is often a V.E.T. developed from an IT point of view rather than from a learning point of view. To overcome issues associated with this type of approach, we have chosen to include experts in didactic and pedagogy in design process of VirTeasy.

We have undertaken an analysis of activity within the framework of “didactique professionnelle” in order to identify the skills which the students were going to learn with our V.E.T. The final aim of this analysis is identification of the “conceptual structure of the situation” (structure conceptuelle de la situation) based on “organizing concepts” (concept organisateur) of the activity links with variables and indicators.

Our first study deals with identifying the “conceptual structure of the situation” in dental implantology. Recorded data (movies) were gathered from ten dentist experts during a live implant surgery. This was followed by in depth interviews within the dentists watching the recording of the surgery and verbalizing their mental process during the procedure. A content analysis of the interview showed that the mental process of the dentist performing an implantology procedure is based on two concepts. The first is concept is “emergence”, the dentist’s actions are guided by the prosthetic teeth which is going to be fitted on the implant. The second is “anchorage”, the dentist’s action are guided by the longevity of the implant. These two concepts are not always compatible which shows the real challenge faced by implant experts.

VirTeaSy design is based on the results of Study 1. Indeed, the objective of our V.E.T. is to enable learners to construct the “conceptual structure of the situation” and make connections between concepts, variables and indicators to manage the conflicts and choices they face in real life. To do this, we set up a five-step methodology that defines: the type of

V.E.T. and its hardware characteristics; the virtual environment and learning situations; the help and assessment interface in the learning situations; the management of complexity in the V.E.T.; and integration of the V.E.T. in a conventional training. A lot of decisions have to be made at each stage of the methodology. These decisions were based initially on literature and led to the definition of general design elements. These components were then specified using the results of the activity analysis. This showed how important and relevant an activity analysis was in making specific and accurate decisions in the design of V.E.T. Because of this process, the V.E.T. is able to teach skills and competences that students must acquire to perform procedures in real life situations.

The original aim of study 2 was to evaluate the VirTeaSy's ability to enable learners to construct the "conceptual structure of the situation" (competences that students must acquire to perform procedures in real life situations). However, the evaluation study was conducted in the project "Formarev" whose deadlines have limited the experimental phase. This meant that we had to use a beta version of VirTeaSy which does not incorporate all the features deduced from the activity analysis. The actual study focused on learning a surgical procedure with an arm force feedback and on its transfer from virtual to reality. The ultimate aim of this experiment was to show the importance of training in virtual reality compared to traditional training or no training at all. To do this, thirty-two dentists are randomized into three groups: one group (n = 10) named Group with Virtual Training (GVT); one group (n = 11) named Group with Traditional Training (GTT) and one group (n = 11) named Control Group (CG) receiving no training. All subjects were novice to dental implantology.

One week after training, all subjects had to perform a task during which they had to demonstrate and apply the skills acquired during the training ("the reinvestment" task consisting of placing an implant on a human corpse). For each subject, we measured the difference between the required performance and the performance achieved using a scanner. We recorded three kinds of measures: angle; depth and center. The results showed no significant difference between the three groups. None of the 2 approaches to training in implantology led to a significant improvement in performing the task required from the subjects within the conditions of the experiment. Finally, note that even though the evaluation of VirTeaSy did not produce the expected results, the research was extremely rich and relevant in terms of the thinking required to put together training (building and content) using Virtual reality technologies.

Extensions of this thesis are being implemented. Some are based on international partnerships with well-known Universities. These extensions are: 1) to extend the activity analysis to an international population, 2) To evaluate VirTeaSy through various protocols including features from the activity analysis, 3) To broaden the scope of using VirTeaSy in dental training. Finally, a collaborative project was introduced to move from a design approach specific for one V.E.T. to a generic design approach based on a platform development.

Key words: Activity analysis, Design and assessment, V.E.T., Dental implantology, "Didactique professionnelle"

- Résumé -

Notre travail de recherche s'inscrit dans le cadre des études menées au Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV) sur les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain (EVAH). Dans ce cadre, nous développons en collaboration avec des experts métiers, des chercheurs en informatique et la société Didhaptic, l'EVAH VirTeaSy dédié à l'apprentissage en implantologie dentaire. L'objectif de cette thèse est double : 1) contribuer à la production de connaissances dans le champ théorique de la didactique professionnelle sur les activités liées aux systèmes vivants ; 2) aider à la conception, à l'ingénierie pédagogique et à l'évaluation de l'EVAH VirTeaSy. Ce projet se déroule en trois phases : analyse de l'activité des chirurgiens-dentistes, conception et ingénierie pédagogique de l'EVAH VirTeaSy à partir des résultats de l'étude 1 et, évaluation de l'EVAH VirTeaSy.

L'examen de la littérature dans le domaine des EVAH dentaires montre que les EVAH « haptiques » semblent être les plus pertinents pour répondre aux problématiques de formation en implantologie. Cependant, bien que des études montrent leur efficacité du point de vue de l'apprentissage, il reste des problèmes à résoudre en termes de méthodologie de conception. En effet, la démarche de conception s'appuie couramment sur des collaborations entre experts métiers et informaticiens qui aboutissent au développement d'EVAH technocentrés. Afin de contourner les écueils constatés dans ce type de démarche, nous choisissons d'inclure les sciences humaines sur l'ensemble du processus de conception de l'EVAH.

Pour identifier les compétences à viser dans l'EVAH, nous mobilisons, dans le cadre de la didactique professionnelle, une analyse de l'activité. Celle-ci se finalise par l'identification de la structure conceptuelle de la situation reposant sur des concepts organisateurs de l'activité en liens avec des variables et des indicateurs.

Notre première étude s'attache ainsi à identifier la structure conceptuelle de la situation en implantologie dentaire. Au cours de situations réelles de pose d'implant dentaire, des données d'enregistrement ont été recueillies et complétées par des verbalisations obtenues lors d'entretiens d'auto-confrontation. L'analyse des données à l'aide de la méthodologie des catégories conceptualisantes nous a permis de faire émerger les concepts organisant l'activité des dix chirurgiens-dentistes observés. L'activité d'implantologie consiste à réaliser un compromis entre le concept organisateur « d'émergence » qui permet de réaliser le projet prothétique et le concept « d'ancrage » qui permet au projet prothétique de durer dans le temps. Ces deux concepts n'étant pas toujours convergents.

La conception de VirTeaSy s'appuie sur les résultats de l'étude 1. En effet, l'objectif de notre EVAH est de permettre aux apprenants de construire la structure conceptuelle de la situation et de faire des liens entre les concepts, variables et indicateurs afin de gérer les conflits auxquels ils sont confrontés en situation réelle. Pour ce faire, nous mettons en place une méthodologie en cinq étapes qui définit : le type d'EVAH à concevoir et ses caractéristiques « hardware », l'environnement virtuel et les situations d'apprentissage, l'enrichissement des situations d'apprentissage grâce à la réalité virtuelle, la gestion de la complexité dans l'EVAH, et l'intégration de l'EVAH à un dispositif global de formation. Notre expérience de cette mise en œuvre méthodologique montre qu'il faut constamment faire des choix. Ces choix reposent dans un premier temps sur la littérature et conduisent à définir des éléments de conception généraux. Ces éléments sont ensuite spécifiés à l'aide des résultats de l'analyse de l'activité, celle-ci prend alors toute sa pertinence afin que l'EVAH traduise les compétences-clefs que les apprenants doivent construire pour être efficaces.

Idéalement, l'étude 2 aurait dû évaluer la capacité de VirTeaSy à permettre aux apprenants de construire la structure conceptuelle de la situation. Cependant, l'étude d'évaluation s'est déroulée dans le cadre du projet « Formarev » dont les échéances ont contraint la période d'expérimentation. Ainsi, nous mobilisons pour cette étude une version Beta de VirTeaSy n'intégrant pas l'ensemble des fonctionnalités déduites de l'analyse de l'activité. L'étude réalisée porte sur l'apprentissage d'un geste chirurgical grâce à un EVAH basé sur une interaction « haptique » et sur son transfert du virtuel au réel. Plus précisément, cette expérimentation s'attache à montrer l'intérêt d'une formation en réalité virtuelle en comparaison avec une formation traditionnelle ou une absence de formation. Pour ce faire, trente-deux dentistes sont répartis de façon aléatoire dans trois groupes : un groupe (n=10) nommé GRV formé dans VirTeaSy, un groupe (n=11) nommé GT formé de manière traditionnelle et un groupe (n=11) nommé contrôle (GC) ne recevant aucune formation. Tous les sujets sont novices en implantologie dentaire. Une semaine après que chaque groupe ait suivi sa formation, tous les sujets réalisent la tâche de réinvestissement consistant à poser un implant sur un cadavre humain. Pour chaque sujet, nous mesurons, à l'aide d'un scanner, la différence entre la performance demandée et la performance réalisée. Les mesures portent sur l'angulation, l'émergence et la centration. Nos résultats ne montrent pas de différence significative entre les trois groupes. Aucune des deux formations à l'implantologie ne provoquent, dans les conditions de l'expérimentation, une amélioration significative des performances des sujets dans la tâche de réinvestissement. Pour finir, notons que si l'évaluation de VirTeaSy n'a pas produit les résultats que nous attendions, elle fut extrêmement riche et pertinente du point de vue de la réflexion à mener sur la construction et le contenu d'une formation utilisant les technologies de la réalité virtuelle.

Des prolongements à cette thèse sont en cours de mise en œuvre. Certains reposent sur des partenariats internationaux avec des universités reconnues. Il s'agit : 1) d'étendre l'analyse de l'activité à une population internationale ; 2) d'évaluer VirTeaSy grâce à différents protocoles incluant les fonctionnalités issues de l'analyse de l'activité ; 3) d'élargir le périmètre de formation de VirTeaSy à l'odontologie. Enfin, un projet collaboratif a été déposé au « Pôle Images & Réseaux » pour rendre générique cette démarche de conception d'EVAH en s'appuyant sur la plate-forme de développement « Mascaret ».

Mots-clefs : analyse de l'activité, conception, évaluation, EVAH, didactique professionnelle, implantologie.